

# Geologia de la Lluna

Damià Crespi

Museu Balear de Ciències Naturals (MBCN). Ctra. Palma-Port de Sóller, km 30,5.  
E-07100. Sóller.

Societat d'Història Natural de les Balears (SHNB). Margarida Xirgu, 16, baixos.  
E-07011. Palma.



Crespi, D. (2010). Geologia de la Lluna. In: Ginard, A., Pons, G.X. i Vicens, D. (eds.). Història i Ciència: commemoració dels 40 anys de l'arribada de l'home a la Lluna. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 16; 61-94. SHNB - OAM - UIB. ISBN 978-84-15081-49-4.

**Resum:** Ja des d'antic es coneix que la Lluna està formada per dos tipus de terrenys que tradicionalment s'han anomenat *maria* i *terrae*. Les mostres recollides per les missions Apol·lo, Luna i els meteorits d'origen lunar trobats a la Terra ens han permès conèixer la composició mineralògica i la petrologia de les roques lunars, així com la seva edat absoluta. Ara sabem que els *maria* estan formats per basalts (un tipus de roca volcànica), mentre que les *terrae* estan composts d'anortosita, que formà l'escorça lunar primitiva.

Un dels descobriments més importants de les sondes Clementine i Lunar Prospector, que arribaren a la Lluna a finals del segle passat, fou la trobada d'aigua gelada a les zones que romanen en l'ombra permanent dels pols.

La Lluna està dominada pels impactes que han configurat la seva morfologia i la seva estructura. A més, s'observen algunes estructures de possible origen volcànic, i d'altres relacionades amb el refredament i la subsidència de les laves.

Les mostres dutes per les diferents missions, així com les observacions dels trets superficials de la Lluna, ens han permès esbossar la seva història geològica. En primer lloc tenim la seva formació que es produí fa uns 4550 milions d'anys, sembla ser per un impacte que arrencà grans quantitats de materials de la Terra; en segon lloc va formar-se l'escorça lunar a partir d'un oceà de magma que ens deixà l'escorça anortosítica fa uns 4200 milions d'anys; en tercer lloc va venir un intens bombardeig asteroidal que formà nombrosos cràters i les conques d'impacte (abans de fa 3800 milions d'anys); després vengué l'ompliment de les conques amb les laves basàltiques dels *maria*. Una vegada s'acabà tota l'activitat volcànica (fa uns 1000 milions d'anys) la superfície de la Lluna només s'ha vista afectada per algun impacte ocasional, per l'efecte de la radiació solar i per la gravetat. Es pot dir que la Lluna és un astre geològicament mort, en què la major part dels seus materials tenen més de 3000 milions d'anys.

L'estudi de la geologia lunar ha facilitat el coneixement geològic que es té d'altres cossos planetaris. Ha estat especialment rellevant en l'estudi de la Terra, ja que la Lluna ens revela com fou la història primigènia del nostre planeta; de Mercuri, ja que la seva superfície és molt semblant a la de la Lluna; de Mart, ja que la zona meridional del planeta s'ha vist que era molt similar a la superfície lunar; i de Venus, ja que l'estudi dels impactes sobre aquest planeta, feta amb els mateixos criteris que els emprats per a la geologia lunar, ens informa sobre la seva dinàmica.

**Abstract:** Since ancient times is known that the moon is made of two types of land traditionally called maria and terrae. The samples collected by the Apollo missions, Moon and meteorites of lunar origin found on Earth have allowed us to determine the mineralogical composition and petrology of lunar rocks, as well as its absolute age. Now we know that the maria are composed of basalt (a type of volcanic rock), while the terrae are composed of anorthosite, which formed the primitive lunar crust. One of the most important discoveries of the Clementine and Lunar Prospector probes that reached the moon by the end of last century, the meeting was ice water in areas that remain permanently in the shadow of dust. The Moon is dominated by impacts have shaped the morphology and structure. In addition, there are some possible volcanic structures, and other related cooling and subsidence of the lava.

Samples for different missions, as well as observations of surface features of the moon allowed us to outline its geological history. Firstly we have the training that took place 4550 million years ago, seems to be an impact burst that large amounts of materials from Earth, and secondly to the crust formed from a lunar ocean magma that left the crust anorthositic 4200 million years ago, in third place came an intense bombardment that formed Asteroid numerous impact craters and basins (before 3800 million years ago), then sold the filling of basins with basaltic lavas of the maria. Once completed all the volcanic activity (about 1000 million years) surface of the Moon is only occasionally affected by any impact, the effect of solar radiation and gravity. You could say that the moon is geologically dead moon, where the bulk of their materials have more than 3000 million years.

The study of lunar geology has provided geological knowledge that has other planetary bodies. It was particularly important in the study of Earth as the moon was the story reveals how our primitive planet Mercury, because its surface is very similar to the Moon, Mars, since the southern part of the world has seen that was very similar to the lunar surface, and Venus, as the study of impacts on this planet, made the same criteria as those used for lunar geology, report on its dynamics.

## Introducció: Generalitats sobre la geologia lunar

La Lluna és l'únic astre del qual nosaltres en podem veure detalls quan l'observam a ull nu. Això és possible per la proximitat a la que es troba, i també perquè a la Lluna hi ha dos tipus de terrenys ben diferenciats per la quantitat de llum solar que reflecteixen (Fig. 1 i 2). Seguint la terminologia establerta des del segle XVII, les zones més fosques són els *maria* (mars en llatí, en singular *mare*), encara que no tenen res a veure amb les mars terrestres i no han tengut mai ni una sola gota d'aigua; les zones relativament més clares s'anomenen *terrae* (terres en llatí, en singular *terra*) en contraposició a les mars. En realitat aquesta diferenciació correspon a diferències en la litologia. Les *terrae* es corresponen a terrenys formats en les primeres etapes evolutives de la Lluna i corresponen a una escorça lunar formada principalment per anortosita (roca plutònica constituïda principalment pel mineral anortita, que és el feldspat de calci), mentre que els *maria* en realitat són planes basàltiques. Els *maria* ocupen el 16% de la superfície de la Lluna, mentre que les *terrae* ocupen el 84% restant (Wilhelms, 1987). Lligats als *maria* trobam zones amb anomalies gravitatòries positives molt marcades, que reben el nom de mascons (paraula formada per la contracció de *mass concentrations*, concentració de massa en anglès). Aquests no tenen equivalències terrestres i s'explicaran en l'apartat dedicat als *maria*.

La primera missió russa, Luna 3, que pogué fotografiar la cara oculta, el 1959, constatà la gran diferència que hi havia entre la cara visible i l'oculta. Quasi totes les mars es troben a la cara visible, encara que a la cara oculta i al límit entre les cares visible i oculta, també existeixen depressions amb basalts recoberts de blocs ejectats pels impactes que varen generar les grans conques d'impacte. Per aquest motiu podem afirmar que aquests basalts són més antics que els

que omplen els *maria* de la cara visible. Així i tot, aquests basalts més antics es troben quasi tots a la gran depressió Aitken del Pol Sud, encara que tenen molt poca potència i no són massa extensos (Spudis, 2008). Aquesta dicotomia entre cara visible i cara oculta es pot deure al fet que l'escorça lunar no té la mateixa gruixa a les dues cares: en la visible assoleix 60 km, mentre que en l'oculta arriba als 100 km. Aquesta diferència de gruixa de l'escorça lunar encara no està ben explicada, però és probable que es degui a la diferència de grans impactes que reberen les dues cares de la Lluna (Anguita, 1988).



**Figura 1:** Cara visible de la Lluna, mosaic d'imatges obtingudes per la sonda Clementine. (NASA/Cortesia de nasaimages.org).

*Figure 1: Near side of the moon, mosaic of images obtained by the Clementine spacecraft. (NASA/Courtesy of nasaimages.org).*



**Figura 2:** Cara oculta de la Lluna, mosaic d'imatges obtingudes per la sonda Clementine. (NASA/Cortesia de nasaimages.org).

*Figure 2: Far side of the moon, mosaic of images obtained by the Clementine spacecraft. (NASA/Courtesy of nasaimages.org).*

Una altra de les característiques de la geologia de la Lluna és que la superfície d'aquesta no es troba alterada per la geodinàmica externa, ja que la Lluna no té atmosfera, ni vent, ni pluges, ni escorrentia superficial. És a dir, no actuen agents externs que modelin la superfície lunar com succeeix a la Terra. La Lluna tampoc no es veu afectada per la geodinàmica interna. Dit amb altres paraules, a la Lluna no hi ha activitat tectònica activa, ni compressiva (com la que forma serralades de muntanyes), ni extensiva (com la que forma fosses tectòniques) així com tampoc no hi ha indicis d'activitat volcànica recent. Les falles, fosses tectòniques i manifestacions volcàniques que es poden evidenciar a la superfície lunar tenen uns quants milers de milions d'anys d'antiguitat, i les úniques modificacions de la superfície lunar es deuen als impactes meteorítics, lliscaments gravitatoris del terreny i a la radiació solar.

Encara que sembla que fa milers de milions d'anys que no hi ha hagut falles actives ni vulcanisme actiu a la Lluna, sí que s'hi han detectat moviments sísmics a una fondària de 800 km. Només són de baixa intensitat (magnitud 1-2 en l'escala de Richter) i potser es deuen a les forces mareals provocades per la Terra.

Finalment cal destacar que ja que actualment la superfície lunar roman pràcticament inalterada podem concloure que els materials i les morfologies superficials que trobam a la superfície lunar són extraordinàriament antics. Aquest fet s'ha confirmat amb les datacions que s'han fetes de les roques dutes en les diverses missions. No obstant això, la Lluna sofreix

alteracions. Ja hem esmentat que la Lluna no té atmosfera, un dels efectes que se'n deriva és que la superfície lunar pateix els efectes de variacions tèrmiques molt acusades, que varien entre un màxim diürn de 107°C i un mínim nocturn de -173°C (Anguita, 1988).

Es pot concloure que la geologia de la Lluna és senzilla quant a les seves característiques generals però complexa en detall (Wilhelms, 1987), ja que la seva superfície és el resultat de l'acumulació d'efectes produïts a la Lluna durant milers de milions d'anys.

## Origen de la Lluna

Per explicar les teories que es tenen sobre l'origen de la Lluna s'han de tenir en compte les peculiaritats del nostre satèl·lit (Anguita, 1988):

- La Lluna és l'únic satèl·lit d'un planeta terrestre, exceptuant els petits satèl·lits de Mart, que probablement són asteroides capturats.
- En primer lloc s'ha de tenir en compte que la Lluna és el satèl·lit més gros en relació amb el planeta sobre el qual orbita (s'exclou Plutó, ja que aquest es classifica actualment en la categoria de planeta nan). La relació de masses entre la Lluna i la Terra (1/81) és molt alta, superant de molt la de Ganimedes/Júpiter ( $1/1,3 \cdot 10^4$ ) i la de Tritó/Neptú ( $1/1,8 \cdot 10^3$ ).
- El sistema Terra-Lluna té un elevat moment angular (que correspon a la suma de les masses d'un sistema per la seva velocitat i pel radi amb què giren), i que es deu a l'elevada velocitat de translació de la Lluna al voltant de la Terra.
- La Lluna té una densitat baixa ( $3,3 \text{ g/cm}^3$ ) respecte a la Terra ( $5,5 \text{ g/cm}^3$ ), cosa que indica que el seu nucli ha de ser molt reduït ( $< 4\%$  de la massa lunar) i que la seva densitat s'aproxima a la del mantell terrestre.
- L'òrbita de la Lluna no es troba al pla equatorial terrestre, però tampoc en el pla de l'eclíptica, sinó en un pla entremig entre els dos, amb  $5^\circ$  d'inclinació respecte aquesta.
- La Lluna no té més d'un 10% del ferro i d'elements afins (sideròfils), mentre que la Terra en té un 30%.
- Té unes cent vegades menys elements i composts volàtils (Na, K, C, Pb i  $\text{H}_2\text{O}$ ) que la Terra.
- Té fins al doble d'elements refractaris (Ti, Ba, Ca o U) que la Terra.

Existeixen quatre teories principals per explicar l'origen del nostre satèl·lit, que es poden trobar explicades a Brush (1986), Wood (1986) i Anguita (1988):

- **Teoria de la formació comuna:** formulada per Roche (1873). Segons aquesta, la Lluna s'hauria format a partir del mateix núvol de pols que la Terra. Aquesta teoria no explica les diferències de composició de la Terra i la Lluna ni el moment angular del sistema Terra-Lluna, anormalment alt.
- **Teoria de l'expulsió:** deguda a George Darwin (1878 i 1879). La Lluna s'hauria format per la separació a partir d'una Terra encara fluïda, degut a que aquesta girava a una velocitat molt elevada en el seu origen. Aquesta teoria explicaria que la composició mitjana de la Lluna s'assembli a la del mantell terrestre, encara que no explica la presència d'elements estranys al satèl·lit ni com ha pogut disminuir de forma tan accentuada la velocitat de rotació de la Terra. A més a més, l'òrbita lunar hauria de ser equatorial i la fissió hauria donat dos cossos més semblants quan a la massa.
- **Teoria de la captura:** formulada per See (1909a, b). La Lluna s'hauria format a una zona allunyada de l'òrbita terrestre del Sistema Solar, i hauria estat capturada per la Terra quan aquesta s'hi hagués apropiat. Hi ha tres mecanismes que fan possible la captura (Jewitt *et al.*, 2008): La primera és que la Terra es veiés envoltada per un núvol de gas i pols que frenàs

el cos planetari quan aquest entra a la zona de possible captura, anomenada esfera de Hill, aquest és un mecanisme anàleg al que realitzen alguns satèl·lits llençats per l'home i que s'han posat en òrbita al voltant d'alguns planetes; el segon mecanisme és que la Terra incrementàs la seva massa quan la Lluna es trobàs a l'esfera de Hill; i la tercera és per la interacció amb un altre cos planetari (conegut com el problema de la interacció entre tres cossos), un d'ells s'accelera i l'altre es frena i entra en òrbita terrestre. El primer cas implicaria que el núvol de gas i pols hauria d'haver estat molt dens, cosa poc probable pel cas del sistema Terra-Lluna, ja que no es creu que la Terra tengués aquest embolcall de gasos en el seu inici i la Lluna és un cos massa gros per ser frenada fàcilment, encara que es creu probable per explicar la captura d'alguns satèl·lits irregulars dels planetes gegants gasosos. En el segon cas no s'explicaria un creixement tan sobtat de la massa terrestre. El tercer cas és tan poc probable mecànicament que un cos de les dimensions de la Lluna quedi en una òrbita estable al voltant de la Terra que avui en dia aquesta teoria s'ha descartat quasi completament. Finalment la composició química de la Lluna, i especialment la seva composició isotòpica, no és la que tendria un cos format enfora de la Terra.

- **Teoria del despreniment:** segons Hartmann i Davis (1974) la Lluna s'hauria format com a resultat de la col·lisió d'un cos planetari de la mida de Mart contra la Terra (teoria de la fissió induïda o hipòtesi del gran impacte). Aquest impacte, que va tenir lloc farà més de 4500 milions d'anys abans del present, hauria després part del mantell terrestre, que junt amb fragments del cos impactant, hauria format un disc de material al voltant de la Terra que s'hauria anat ajuntant fins a formar la Lluna. Els petits cossos que s'uniren per formar la Lluna s'acumularen tan de pressa que la calor generada en líquà les capes externes i formà un oceà de magma. L'escorça lunar es formà pels minerals de baixa densitat que suraren per sobre d'aquest oceà magmàtic. Aquesta teoria és la que té més seguidors actualment, ja que explica alguns dels problemes clàssics sobre l'origen lunar: la menor densitat i quantitat d'elements sideròfils són lògics, així com el petit nucli lunar, ja que la matèria que formà la Lluna prové del mantell terrestre amb part del cos impactant; a la col·lisió es generà una gran quantitat de calor que eliminà els elements volàtils, i enriquí el núvol protolunar en elements refractaris; la gran mida de la Lluna és explicable pel fet que un cos impactant gros podia haver vaporitzat i posat en òrbita varies masses lunars. El principal inconvenient d'aquesta teoria és que no explica perquè no hi ha més satèl·lits com la Lluna envoltant altres planetes terrestres, si se suposa que aquests impactes gegants foren freqüents en els inicis del Sistema Solar.

## Materials de la Lluna

### Mostres recollides

Actualment, disposam de mostres de roques i de regolita lunars de tres fonts diferents:

Les obtingudes pel programa Apol·lo nord-americà, des de l'Apol·lo XI (1969) fins a l'Apol·lo XVII (1972), que en total sumen 2415 mostres. Les expedicions que retornaren més mostres foren els Apol·lo XV, XVI i XVII, i en total s'obtingueren aproximadament 382 kg de mostres de diverses parts de la Lluna.

Les obtingudes pel programa Luna soviètic, amb les sondes no tripulades Luna 16 (1970), Luna 20 (1972) i Luna 24 (1976), que aportaren en conjunt 326 g de sòl lunar.

Des de l'any 1980 es disposa de meteorits originats per impactes a la Lluna, que han aportat mostres representatives de la superfície del nostre satèl·lit. En total es tenen 120 meteorits lunars que corresponen a 60 caigudes sobre la Terra, que sumen una massa total de 48

kg. Molts d'ells han caigut sobre l'Antàrtida i han estat recollits per missions nord-americanes i japoneses, la major part de la resta de mostres han estat recollides per recol·lectors anònims a zones desèrtiques del nord d'Àfrica i d'Oman.

La Lluna és l'únic cos del Sistema Solar, deixant de banda la Terra, del que es tenen mostres geològiques recollides en el seu context geològic.

## La regolita

La regolita també s'anomena sòl lunar, està formada per roca fragmentada que varia entre la mida argila i blocs de diversos metres de diàmetre, produïda pels continus impactes meteorítics que rep la superfície de la Lluna. Els centímetres superiors estan formats per una substància pulverulenta, cohesiva, de color marró o grisa, de mida de gra entre el llim i l'arena fina (Strahler, 1992). La regolita té una potència mitjana de 5 a 6 m en els *maria* i de fins a 10 m a les *terrae*. Aquest material solt és fàcil de penetrar, però quan està compactat és capaç de suportar el pes dels astronautes i del seu equip.

La regolita lunar ha resultat ser un conjunt de minúsculs fragments rocosos de basalts i d'anortosites, materials que seran explicats a continuació, així com també es troben nombroses bolletes vítries anomenades esfèrules (Strahler, 1992). Es considera que les esfèrules es formen com a "esquitxos", resultants del refredament sobtat de la roca fusa per l'impacte. Seria com un raig atomitzat de gotetes. Durant els darrers 1000 milions d'anys la regolita s'ha anat formant a raó d'1 mm cada milió d'anys (Wilhelms, 1987).

Una altra característica interessant de les roques trobades a la superfície lunar és la presència de foradets de menys d'1 mm de diàmetre, envoltats de vidre (Strahler, 1992). Aquests forats s'anomenen *zap pits* en anglès i es formen per microimpactes. Això suposa una mena de procés erosiu que funciona sobre la superfície actual de la Lluna.

Finalment cal destacar la importància que ha tengut sobre la regolita el bombardeig continuat del vent solar format bàsicament per protons i electrons, que durant milers de milions d'anys, ha afectat profundament la superfície lunar (Smoluchowski, 1986). Com a resultat d'aquest bombardeig la superfície s'ha anat obscurint i fa que les partícules fines, que queden ionitzades, es vagin adherint entre elles, cosa que fa que els impactes meteorítics i els materials que mobilitzen es vegin blancs, ja que exposen materials que no han sofert aquesta acció d'enfosquiment.

## Bretxes

Les bretxes estan formades per fragments de roques lunars soldades entre elles per una matriu vítria. Es formen per l'efecte dels impactes sobre la superfície lunar i són les roques més freqüents sobre la seva superfície. Els clastes que constitueixen les bretxes poden provenir d'altres bretxes anteriors, així com de les roques que formaren la Lluna primitiva. Així, un sol tros de breixa lunar pot contenir representants de roques ígnies de fonts molt diverses. S'ha comprovat que quasi tot el material suficientment dur per ser anomenat roca consisteix tan sols en fragments de roques o fragments cohesionats de roques (Strahler, 1992). Tot el que sabem de la petrologia lunar prové dels fragments de roques que constitueixen les bretxes, que representen les litologies que tenen per davall.

Com ja hem dit, l'origen de les bretxes es troba en els impactes que rep sobre la seva superfície. Aquests impactes cimenten partícules que prèviament s'havien fragmentat pel xoc, segons un procés anomenat metamorfisme d'impacte (Strahler, 1992). Les bretxes constitueixen una potent capa que en les *terrae* pot arribar a tenir una potència mitjana de 2 km, de vegades anomenada megaregolita.

## Basalts dels maria

Els basalts són les roques volcàniques que han omplert les conques d'impacte sobre les que es localitzen els maria (a la fig. 3, el Mare Imbrium). Els basalts tenen equivalents terrestres ben coneguts, com a la roca volcànica més comuna al nostre planeta, i està formada pel feldspat plagioclasi càlcic (anortita), piroxè i comunament també olivina. El basalt lunar és molt semblant, llevat que els basalts dels maria són més rics en ferro i més pobres en sílice que els terrestres (Strahler, 1992). Els basalts dels maria arriben a tenir colades de fins a 1000 km de longitud (Anguita, 1988), cosa que ens indica que la Lluna ha passat per etapes de temperatura elevada, en què les laves arribaven a assolir temperatures de 1200 a 1400°C (quan les temperatures terrestres típiques d'una lava basàltica són de 1000°C). Aquestes laves tenien una viscositat semblant a la de l'oli de motor (Anguita, 1988). L'etapa principal de formació dels basalts se situa entre els 3900 i els 3200 milions d'anys abans del present, encara que va existir un vulcanisme residual fins fa 1000 milions d'anys.



**Figura 3:** Vista del Mare Imbrium mirant cap al sud. Devora l'horitzó es veu el cràter Copèrnic, més a prop es veuen alineacions de cràters secundaris i cràters allargats deguts a l'impacte del cràter Copèrnic. Al centre de la imatge es troba el cràter Pytheas i a l'extrem superior del Mare Imbrium hi ha els Montes Carpatius.  
(NASA/Cortesia de nasaimages.org).

**Figure 3:** View of Mare Imbrium looking south. Along the horizon is the Copernicus crater, closer alignment of craters are secondary craters and elongated craters due to the impact of Copernicus crater. The center image is the Pytheas crater and the upper end of Mare Imbrium is the Montes Carpatius.  
(NASA/Courtesy of nasaimages.org).

Segons la seva composició, des dels dies de les primeres missions Apol·lo, s'han diferenciat en basalts rics en titani, pobres en titani i molt pobres en titani, segons el contingut en aquest element químic. Això fou degut a que els primers astronautes que arribaren a la Lluna amb la missió Apol·lo XI recolliren mostres lunars que resultaren ser basalts anormalment rics en titani. Aquest fet suposà un dels problemes més intrigants de les missions Apol·lo, els geòlegs lunars trobaren moltes dificultats per explicar com els magmes d'alta densitat i elevat contingut en titani pogueren ascendir per sobre de l'escorça anortosítica, menys densa. Les missions Clementine i Lunar Prospector, que la NASA dugué a terme als anys noranta del segle XX, demostraren que les grans quantitats de titani trobades per l'Apol·lo XI són molt rares a la Lluna. Encara que els basalts dels maria lunars presenten diverses concentracions en titani, només una petita fracció contenen les quantitats extremes observades al Mare Tranquillitatis. Així es tanca un dels problemes més inexplicables de la geologia lunar (Spudis, 2008).

La nau Galileo, en el seu viatge cap a Júpiter, va realitzar dos vols sobre el sistema Terra-Lluna, va observar els maria per mitjà de filtres espectrals que facilitaren informació sobre la seva composició superficial; els resultats provaren que la teledetecció pot establir la successió de fluxos de lava dels maria (Spudis, 2008). L'edat de cada colada es determina mesurant la densitat de cràters d'impacte. Com ja s'explicarà més endavant, els maria més primitius han estat exposats a un intens bombardeig durant més temps que els maria més recents, per la qual

cosa presenten una major densitat de cràters. S'ha calculat l'edat dels *maria* en els llocs on allunitzaren les missions Apol·lo per mitjà dels radioisòtops, les dels altres *maria* s'ha calculat comparant les densitats de cràters entre ells (Spudis, 2008).

Encara que els *maria* destaquen pel seu color fosc, també hi ha regions de les *terrae* amb una reflectància intermèdia entre els *maria* i les *terrae*, i amb un elevat contingut en ferro, Fe. Algunes d'aquestes són dipòsits de *maria* coberts per blocs de les terres altes ejectats pels impactes que generaren les depressions. Així doncs són *maria* que es formaren abans de l'acabament de la formació de les conques d'impacte, fa 3800 milions d'anys (Spudis, 2008); és a dir el vulcanisme es va iniciar a una etapa anterior a la de formació dels grans *maria* de la cara visible. Aquest fet ja se sospitava amb anterioritat (Wilhelms, 1987), però ha estat confirmat per les dades de les sondes Clementine i Lunar Prospector. Aquestes colades antigues es troben sobretot a la cara oculta i al límit entre les cares visible i oculta. L'acumulació més important de basalts de *maria* de la cara oculta es troba a la gran depressió Aitken del Pol Sud (Spudis, 2008).

Unes altres roques relacionades amb els basalts dels *maria* són els KREEP. Aquestes són roques volcàniques enriquides en potassi (símbol químic K), terres rares (*Rare Earth Elements*, en anglès) i fòsfor (símbol químic P). Aquestes roques es coneixen per les mostres recollides a l'*Oceanus Procellarum* per les missions Apol·lo XII i Apol·lo XIV. Aquests elements són incompatibles: no encaixen bé en els minerals que trobam normalment a les roques comunes. L'existència de roques riques en KREEP indiquen que la Lluna sofrí intensos processos de fusió i diferenciació magmàtica, durant els quals els elements incompatibles s'anaven concentrant en la part fusa, que acabà donant magmes rics en KREEP. La nau Lunar Prospector a finals dels anys noranta del segle passat va descobrir que les majors concentracions en KREEP es donen a l'*Oceanus Procellarum* encara que es desconeix el motiu d'aquesta distribució (Spudis, 2008).

Com ja hem comentat abans, associats als *maria* hi ha grans anomalies positives de gravetat (els mascons). Aquestes es coneixen des dels primers temps de l'exploració espacial, i són tan intenses que alteren de manera significativa les trajectòries de les naus en òrbita. Inicialment es pensava que podien correspondre a la gran potència que podien assolir els basalts dels *maria*, que no es veuria compensada isostàticament degut a la rigidesa de l'escorça lunar. Anguita (1988) arriba a afirmar que els basalts probablement assoleixin els 8 km de gruix en alguns punts. La sonda Lunar Prospector va obtenir dades de gravimetria més precises, i es va veure que la gravetat era encara més alta del que s'esperava quan sobrevolava algunes de les conques més recents. Segons Spudis (2008) els basalts no semblen ser els culpables de les anomalies ja que les acumulacions totals no semblen ser superiors als 200 m. La causa més probable de les anomalies serien les intrusions de roques denses procedents del mantell lunar a l'escorça davall de les depressions en què es localitzen els *maria*.

## Anortosites

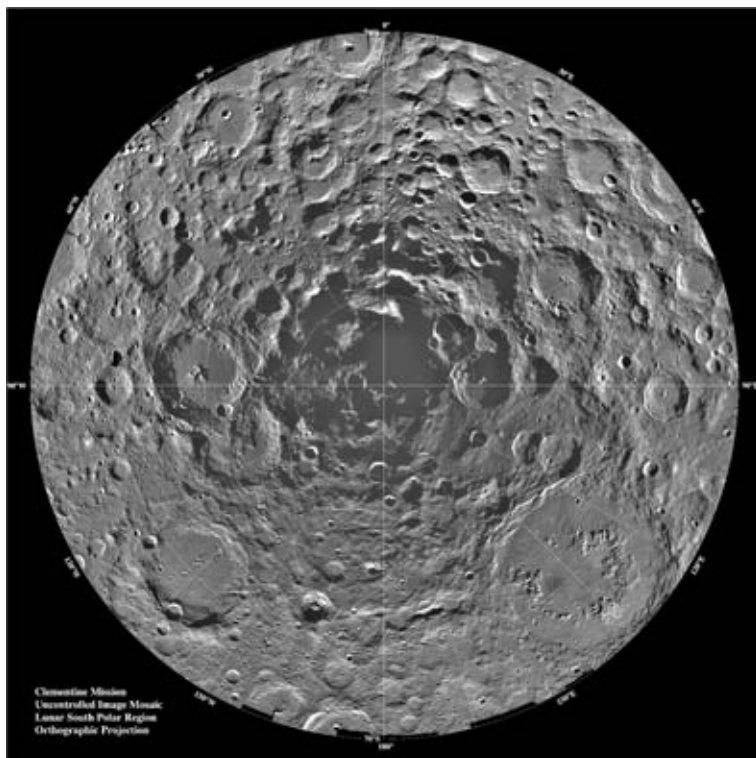
Són roques plutòniques formades bàsicament pel feldspat del grup de les plagiòclasis anomenat anortita (feldspat de calci,  $\text{CaAl}_2\text{Si}_2\text{O}_8$ ). Alguns autors prefereixen referir-se a aquestes com a anortosita gàbrica o gabre anortosític, ja que la seva composició és intermèdia entre la dels gabres i la de les anortosites. Algunes mostres tenen una composició més semblant a la de les norites i de les troctolites. Les anortosites tenen el seu equivalent terrestre, encara que a la Terra són un tipus de roca molt infreqüent. Es creu que es varen formar quan es fongué l'escorça de la Lluna i aquesta va quedar coberta per un oceà de magma. Quan aquest començà a refredar-se cristal·litzaren les anortites, que en ser menys denses que el magma suraren per sobre i formaren l'escorça anortosítica. Sembla que l'escorça lunar quedà consolidada fa aproximadament 4200 milions d'anys. Aquests descobriments, que daten de l'època en què s'analitzaren les mostres obtingudes per les missions Apol·lo, varen ser confirmats amb les dades de les missions Clementine i Lunar Prospector, que establiren la distribució global i la gran quantitat d'anortosita present a la Lluna (Spudis, 2008). Actualment es pensa que l'única



font de calor que pogué liquar la Lluna sencera fou l'acumulació molt ràpida de cossos petits. És a dir que la presència d'anortosita dóna suport a la teoria de la formació de la Lluna per un gran impacte (Spudis, 2008).

## Aigua

A l'any 1994, el Departament de Defensa dels Estats Units llençà la sonda Clementine. Mentre envoltava la Lluna en òrbita polar havia de provar uns sensors contramíssils. Aquesta sonda va orbitar la Lluna durant 71 dies. El més important és que va obtenir proves, mitjançant un experiment improvisat amb un radar, de l'existència d'aigua gelada a les regions del Pol Sud que sempre estan a l'ombra (Fig. 4). Les superfícies rocalloses dispersen les ones de ràdio de forma aleatòria; en canvi el gel les reflecteix de forma coherent. Quan Clementine dirigí les ones cap al Pol Sud en ombra permanent, les senyals reflectides correspongueren a les d'una superfície gelada. Posteriorment, la NASA va situar en òrbita lunar el Lunar Prospector a l'any 1998, que en cartografià la superfície per mitjà d'espectroscòpia de rajos gamma i neutrons. Aquestes permeteren observar grans quantitats d'hidrogen a las regions obscures dels dos pols, per la qual cosa la hipòtesi més versemblant és que correspongués a l'hidrogen de l'aigua gelada. Es confirmà així l'existència de gel en el Pol Sud i es descobriren nous dipòsits en el Pol Nord. Les estimacions actuals apunten que existeixen més de deu mil milions de tones de gel, amb una gruixa de 30 cm, a la superfície dels dos pols. Finalment la nau xocà contra el nostre satèl·lit, ja que s'esperava que sorgís un raig de vapor d'aigua, però no s'observà res (Spudis, 2008).



**Figura 4:** Pol Sud de la Lluna. A les zones a l'ombra s'hi han descobert dipòsits d'aigua. Mosaic aproximadament de 1500 imatges obtingudes per la sonda Clementine. (NASA/Cortesia de nasaimages.org).

*Figure 4: South Pole of the Moon. In the shadow areas have been uncovered water deposits. Mosaic of approximately 1500 images obtained by the Clementine spacecraft. (NASA/Courtesy of nasaimages.org).*

El dia 9 d'octubre de 2009 la NASA deixà caure la sonda LCROSS (*Lunar Crater Remote Observation and Sensing Satellite*) dins del cràter Cabeus, a la zona d'ombra permanent de la Lluna propera al Pol Sud. Primer impactà la carcassa buida del coet Centaur que havia transportat la sonda. Aquesta pogué observar el plomall de roques, pols i vapor que es desprendé amb l'impacte, poc abans d'impactar ella mateixa contra la Lluna. Les observacions

preliminars ja detectaven la presència d'aigua, però els resultats més sorprenents s'obtingueren després d'analitzar les dades obtingudes, que han estat publicades recentment (Colaprete *et al.*, 2010; Schultz *et al.*, 2010; Gladstone *et al.*, 2010).

Colaprete *et al.* (2010) se centren en l'estudi de les dades dels espectròmetres de l'infraroig proper i de l'ultraviolat-visible de la sonda LCROSS. Segons els seus càlculs el primer impacte va projectar uns 155 kg de vapor i gel d'aigua. Això els permet avaluar que un 5,6% de la massa de l'interior del cràter Cabeus podria estar format per gel d'aigua. També detectaren la presència d'altres composts volàtils com els hidrocarburs lleugers, composts de sofre i diòxid de carboni. Fins i tot hi podria haver plata.

Schultz *et al.* (2010) estudiaren l'efecte del primer impacte tal com es pogué observar des de la sonda LCROSS, i supervisaren les nombroses etapes de l'impacte i de la formació del plomall dels materials expulsats. El coet formà un cràter d'impacte d'entre 25 i 30 m de diàmetre i projectà una massa total de entre 4000 i 6000 kg de roques, pols i vapor, des del cràter fins al camp de visió de la LCROSS il·luminat per la llum solar.

Gladstone *et al.* (2010) centren el seu estudi en l'efecte que produí l'impacte de la sonda, uns 90 segons més tard, sobre la superfície lunar, i que fou registrada per l'orbitador LRO (*Lunar Reconnaissance Orbiter*). Aquest està dotat d'instruments sofisticats, com el LAMP (*Lyman Alpha Mapping Project*). Aquest instrument està dissenyat per estudiar les zones fosques de la Lluna a l'ombra permanent. L'espectrògraf ultraviolat observa la zona de la superfície lunar a les fosques utilitzant la llum de l'espai circumdant (i de les estrelles). Aquesta llum (línies d'absorció Lyman-alfa) és invisible per a l'ull humà, però el LAMP en capta el reflex a la superfície lunar, la qual cosa en permet determinar les seves propietats. Gràcies al LAMP situat al LRO s'ha pogut confirmar la presència de diversos gasos al plomall generat per l'impacte de la LCROSS com l'hidrogen molecular, el monòxid de carboni i el mercuri atòmic, així com petites quantitats de calci i magnesi gasosos.

Així com la presència d'aigua és un motiu d'alegria entre els investigadors, ja que facilita la instal·lació de bases lunars robòtiques i tripulades, la presència de mercuri pot ser un greu inconvenient, degut a l'elevadíssima toxicitat d'aquest element. Les dades ofertes per Gladstone *et al.* (2010) indiquen que se'n podria haver volatilitzat més de 100 kg amb l'impacte, cosa que indicaria que el mercuri és quasi tan abundant com l'aigua al cràter Cabeus. La possible presència de mercuri en les mateixes trampes en les que hi hauria l'aigua ja havia estat predita amb anterioritat per Reed (1999). La presència de mercuri s'havia detectar amb certa abundància a les roques lunars i, segons Reed (1999), podria acumular-se a les zones fredes de la Lluna, amb un mecanisme anàleg al que acumularia l'aigua, que potser un procés molt lent, de milions d'anys, en què s'acumulen els elements i els composts volàtils, de vegades partícula a partícula. Reed ja titulava el seu article d'una manera molt encertada "*don't drink the water*" (no begueu l'aigua) fent referència a l'elevada toxicitat del mercuri que faria que l'aigua fos un autèntic verí pels futurs habitants de les bases lunars.

Per explicar la presència d'aigua gelada a la superfície lunar s'ha de tenir en compte que l'eix de rotació lunar es troba inclinat només 1,5 graus; és a dir, és quasi perpendicular al pla orbital del sistema Terra-Sol. El Sol il·luminarà sempre qualsevol lloc proper al pol lunar elevat per sobre dels 600 m per damunt de la superfície mitjana, així existeixen regions properes als pols que sempre reben la il·luminació del Sol. En canvi si un punt es troba deprimit per davall dels 600 m d'alçada romandrà a l'ombra perpètua. El més sorprenent és que aquesta ombra perpètua dura des de fa 2000 o 3000 milions d'anys. Així es creen trampes gèlides amb temperatures entre 223 i 203 graus sota zero, que poden acumular aigua dels cometes i meteorits que xoquen contra la Lluna, ja que mai s'evapora l'aigua per la calor del Sol.

L'existència d'aigua a la Lluna és una bona notícia a l'hora de pretendre establir colònies permanents al satèl·lit ja que facilita la supervivència dels seus habitants i pot usar-se per obtenir oxigen i hidrogen, com a combustible. Encara que la recent descoberta de mercuri associat a les trampes on es troba l'aigua pot dificultar, o impedir, el seu ús pels humans. Abans de conèixer-se

l'existència d'aigua a la Lluna l'única possibilitat d'obtenir l'oxigen era a través dels òxids que es troben a les roques lunars, i l'hidrogen procedent del vent solar atrapat a la regolita (Romero i Crespi, 1992).

## Estructures

### Conques d'impacte

Són depressions de més de 300 km de diàmetre, formades per grans impactes, que poden arribar a fer milers de quilòmetres de diàmetre, foren formades en les primeres etapes de l'evolució lunar (Wilhelms, 1987). La nau Clementine als anys noranta del segle passat en va trobar algunes que es desconeixien. Es calcula que a la Lluna n'hi pot haver més de 45 (Spudis, 2008).

Només es coneixen les edats absolutes de les conques que varen ser visitades per les missions Luna i Apol·lo. La datació radioisotòpica de les mostres de roques que es fongueren quan un asteroide o cometa xocà contra la Lluna, i que ens senyalen l'edat de formació de la conca, ens indiquen que es formaren en un període molt breu. Això ha donat peu a la teoria del "gran cataclisme" segons la qual les conques d'impacte es formaren entre fa 3900 i 3800 milions d'anys. Amb això es presenta una gran incògnita: com va poder donar-se aquest diluvi d'asteroides i cometes? Els primers models de les primeres etapes de la història del Sistema Solar predeien una disminució en la freqüència de formació d'impactes fa més de 4000 milions d'anys, ja que la majoria dels planetesimals foren expulsats del Sistema Solar o absorbits pels planetes exteriors. Si es datassin més conques d'impacte i es confirmàs que el cataclisme va succeir realment, les conseqüències serien profundes per a la història dels planetes interiors (Spudis, 2008). Una explicació seria que fa uns 3900 milions d'anys es trencàs un objecte molt gros del cinturó d'asteroides, i les seves restes arribassin al sistema Terra-Lluna. Si succeí així, la història dels cràters lunars no s'hauria repetit a altres bandes del Sistema Solar, llevat de a la Terra, i no valdria com a guia per a la datació per cràters.

Per confirmar-se la realitat del cataclisme s'hauria de mesurar l'edat absoluta de la depressió Aitken del Pol Sud, ja que és la més antiga. Si la seva edat resulta ser més propera a la de la solidificació de l'escorça lunar (fa una 4200 milions d'anys) no faria falta mantenir la teoria del "gran cataclisme terminal" mentre que si la seva edat és més propera a la única conca que s'ha datat absolutament amb mostres fuses d'impactes (*Serenitatis* amb una edat calculada de 3870 milions d'anys) es reforçaria aquesta teoria (Spudis, 2008).

Moltes conques estan cobertes per les laves dels *maria*. Encara que les de la cara oculta contenen molt menys basalts que els de la cara visible. La morfologia quasi circular de moltes mars com la del *Mare Crisium* i la del *Mare Nectaris* permet que aquestes puguin reconèixer-se fàcilment com a conques d'impactes. Les conques circulars solen estar envoltades d'alineacions muntanyoses (*montes* en la terminologia usada habitualment) com els *Montes Alpes* i els *Montes Apenninus*, que envolten la gran conca *Imbrium*. De vegades aquests *montes* no es troben només a les vores dels *maria* sinó que es poden trobar al seu interior formant anells muntanyosos. L'exemple més clar és el del *Mare Orientalis*, que per constituir la conca d'impacte més jove és la més ben preservada i conserva molt bé aquesta característica. Altres muntanyes dels anells interiors es poden veure com a "illes" dins de les planes basàltiques dels *maria*, uns exemples serien els *Montes Teneriffe* o els *Montes Spitzberger* de la mateixa conca *Imbrium*. Segons sembla els anells es formen pel rebot de la superfície experimentada just després de l'impacte.

Algunes morfologies es poden relacionar amb l'origen de les conques d'impacte. Un exemple el trobam a la cara visible central i septentrional que està caracteritzada per l'existència de relleus ondulats i canals radials a la conca *Imbrium*, que corresponen a materials llençats per l'impacte que l'originà (Wilhelms, 1987). La *terra* situada a l'est de la conca circular *Serenitatis* també es troba envoltada d'un relleu retallat d'elevacions i depressions menys regulars que la *Imbrium*. Al voltant de les grans conques d'impacte també són freqüents els cràters secundaris, formats per l'impacte generat pels materials llençats en la formació de la conca. Aquests són diferenciables per les seves formes que poden ser menys circulars que la dels cràters primaris i per trobar-se agrupats formant carenes de cràters.

La conca més antiga és l'Aitken del Pol Sud, que també és la més grossa de totes. Aquesta es pot veure en la Fig. 2 a l'extrem sud com una zona més fosca que les *terrae*, però no tant com ho seria un *mare*. El mapa topogràfic generat per la sonda Clementine va mostrar que aquesta depressió tenia unes dimensions extraordinàries, amb un diàmetre de 2600 km, no hi ha cap impacte major en tot el Sistema Solar (Spudis, 2008). No és coneix la seva edat absoluta però podria haver estat generada poc després de la solidificació de l'escorça lunar, fa 4200 milions d'anys. Encara que també podria haver-se generat més a prop del "cataclisme meteorític terminal" del Nectarià, en tot cas aquesta qüestió no es resoldrà definitivament fins que se n'estableixi l'edat, amb mètodes de datació absoluta. La més moderna de les conques d'impacte és la *Orientale*, que és la més ben preservada i la que ens aporta més informació sobre la gènesi i l'estructura de les conques d'impacte, sobretot perquè és la que té els anells més clarament visibles. La conca *Orientale* es formà a l'acabament de l'Imbrià inferior, fa uns 3.800 milions d'anys i suposa el final de l'etapa de formació de les grans conques d'impacte, i un canvi radical en l'evolució geològica del nostre satèl·lit, a partir de llavors més dominada pel vulcanisme i els petits impactes (Wilhelms, 1987).

Una de les coses que sorprèn és la diferència en la densitat de les conques d'impacte entre la cara visible i l'oculta (Fig. 1 i 2). A la cara visible les conques d'impacte són molt més abundants i estan sempre cobertes per basalts dels *maria*, mentre que a la cara oculta les conques d'impacte són menys abundants i n'hi ha que no estan totalment cobertes pels basalts. A més a més, com ja hem comentat, hi ha una notable diferència entre la gruixa de l'escorça lunar a la cara visible (60 km) i a la cara oculta (100 km). Aquesta diferència de gruixa pot deure's a l'erosió soferta a la cara visible pels grans impactes (Anguita, 1988). Una possible explicació per a aquesta asimetria seria que la gravetat terrestre ha desviat els cossos que han provocat els impactes cap a la cara lunar que mira cap a la Terra (Anguita, 1988).

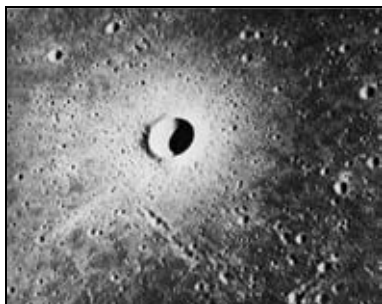
## Cràters

Els cràters són estructures d'impacte amb un diàmetre inferior a 300 km. Abasten des de grans cràters que podem veure amb facilitat des de la Terra amb uns binoculars fins a microforats observats en les mostres duites a la Terra (Wilhelms, 1987). Els cràters són a tot arreu a la superfície lunar, no hi ha pràcticament cap terreny d'una certa superfície que no n'estigui afectat. A grans escales són més nombrosos als *terrae* que als *maria*, de fet l'abundància de cràters és un bon criteri per fer datacions a la Lluna. No sols serveix per fer datacions relatives (els terrenys més crateritzats són els més antics) sinó que fins i tot poden servir per fer datacions absolutes amb una certa precisió, si prèviament comptam amb mostres datades absolutament que poden correlacionar-se amb terrenys que presenten una densitat concreta d'impactes.

La major part dels cràters selenites tenen les vores elevades i el fons enfonsat respecte al terreny que els envolta. Els cràters menors de 16 a 21 km de diàmetre tenen poques morfologies interiors (Fig. 5). Els cràters majors són més complexos (Fig. 6 i 7), tenen un pic central, terrasses interiors en forma d'arc i altres morfologies interiors. L'exterior de certs cràters s'assembla als materials que tenen al seu voltant excepte per tenir una vora poc marcada; altres tenen una estructura gruixada concèntrica prop de la cresta de la vora, canals als flancs i

nombrosos cràters satèl·lits (Fig. 3), que es formen per ejecció i posterior impacte de materials llençats per l'impacte principal (Wilhelms, 1987). Els cràters satèl·lits són més nombrosos a una distància d'entre un i tres radis del cràter. Els rajos de colors clars poden irradiar centenars o milers de quilòmetres d'alguns cràters recents (aquí recent ens referim a escala lunar).

A la superfície de la Lluna podem trobar algunes cadenes de cràters. El més probable és que s'hagin format durant el mateix episodi, es creu que es creen quan un meteor es fragmenta en diversos trossos abans d'assolir la superfície de la Lluna.



**Figura 5:** Cràter Linné, situat a la part occidental del *Mare Serenitatis*. És un exemple de cràter simple de 4 km de diàmetre, format per un impacte recent. En aquesta foto obtinguda per l'Apol·lo XV s'aprecia un cràter que té totes les característiques d'un cràter jove; els pendents de la vora del cràter s'aixequen sobre la plana del *mare*; la vora de la cresta és aguda i ben visible, s'observen abundants ondulacions devora la cresta; la part interna dels ejecta està formada per morfologies amb forma de duna disposades de forma concèntrica; a mesura que ens anam allunyant del cràter anam trobant cràters satèl·lits; els rajos dels ejecta són visibles. (NASA/Cortesia de nasaimages.org).

*Figure 5: Linné Crater, located in the western part of Mare Serenitatis. It is an example of simple crater of 4 km in diameter, made an impact recently. In this photo from the Apollo XV observed a crater that has all the features of a young crater; the slopes of the rising edge of the crater on top of the mare; the edge of the crest is sharp and well visible ripples observed abundant beside the ridge, the inner part of the ejecta consists of a shaped concentric morphologies, if we go away from the crater we found the satellite craters; and we can see ejecta rays. (NASA/Courtesy of nasaimages.org).*

La formació dels cràters segueix una sèrie d'etapes (Strahler, 1992). L'elevada energia cinètica del cos impactant es transfereix instantàniament al terra. Es fon el sòl en la zona d'impacte i es genera una ona de xoc, que fractura intensament la roca al voltant del punt d'impacte. Als impactes terrestres, on moltes roques contenen quars es formen els minerals coesita i stishovita que són polimorfs d'alta pressió de la sílice ( $\text{SiO}_2$ ). Una ona de xoc semblant es transfereix al meteorit, el fragmenta en milers de fragments i en part el volatiliza. Per aquest efecte surt llençada una gran quantitat de fragments. La roca del terra es volta cap amunt i cap a fora, i forma la vora del cràter. Grans volums de material rocallós tornen caure en el cràter i omplen el fons, on pot quedar enterrada la roca fusa. En els impactes de majors dimensions apareix un pic central al cràter (Fig. 6 i 7), produït pel rebot del fons.

**Figura 6:** Cràter *Daedalus*. Localitzat al centre de la cara oculta de la Lluna, és un exemple de cràter complex de 93 km de diàmetre, amb l'interior aterrat i amb pic central. Imatge presa per l'Apollo XI. (NASA/Cortesia de nasaimages.org).

*Figure 6: Daedalus crater. Located in the center of the dark side of the moon is an example of complex crater of 93 km in diameter; inside the central peak and terraced. Image by Apollo XI. (NASA/Courtesy of nasaimages.org).*



En els impactes selenites més recents es poden veure els rajos d'ejecta (Fig. 3 i 5), que irradien a partir del cràter. Aquests indiquen que l'impacte es recent sobre la superfície lunar, un exemple seria el del cràter Tycho, amb ejecta radials. Els fets que estiguin tan ben desenvolupats

a la Lluna es deu a la manca d'una atmosfera que freni els fragments de roca expulsats, i posi en suspensió material, i a la baixa gravetat de la Lluna. El cràter Copèrnic també presenta rajos d'ejecta però aquests tenen un aspecte bastant diferent, ja que els ejecta tenen més aspecte de teranyina que radial. Això pot ser degut al fet que es produeixen en dues zones ben diferenciades des del punt de vista geològic. El cràter Copèrnic es produí en materials dels *maria*, mentre que Tycho s'originà en materials dels *terrae*, probablement originalment més fragmentats per l'efecte d'impactes antics.



**Figura 7:** Cràter Timocharis. La foto s'ha obtingut a partir d'una seqüència d'imatges cartogràfiques de l'Apollo XV. Està situat al *Mare Imbrium* i té 24 km de diàmetre i 3,1 km de fondària. L'interior està aterrat i esllavissat. Aquest cràter té un sistema de rajos que assoleixen els 130 km. El desgast dels rajos ens indica que la seva edat és de 1000 milions d'anys o més. (NASA/Cortesia de nasaimages.org).

**Figure 7:** Timocharis crater. The photo was obtained from an image sequence map of Apollo XV. It is situated in the *Mare Imbrium* and is 24 km in diameter and 3.1 km deep. The interior is terraced and slipped. This crater has a system of rays that reach the 130 km. The wear-ray shows that his age is 1000 million years or more. (NASA/Courtesy of nasaimages.org).

### *Rimae i rupes*

Les *rimae* (en singular *rima*) en realitat són fosses, de les quals en podem diferenciar dos tipus que presenten gènesis molt diferents (Fig. 8 i 9). En els treballs escrits en anglès les *rimae* també s'anomenen *rilles*. En primer lloc tenim les *rimae* rectes (Fig. 9), que es troben en els *maria* però també en algunes *terrae*. Les dels *maria* es formarien pel refredament de les grans masses de basalts que els omplen, mentre que les *rimae* localitzades en *terrae* es relacionarien més bé amb els episodis de grans impactes que generaren les conques. Aquestes fosses es veuen com a depressions estretes i de traça rectilínia (Wilhelms, 1987).

Un altre tipus de *rimae* són les sinuoses (Wilhelms, 1987; Fig. 8). Vistes des de dalt semblen lleres de rius secs. Poden estar ramificades i de vegades recorren centenars de quilòmetres. Per comparació amb altres estructures terrestres sembla que corresponen a tubs subterranis per on fluïa la lava i que s'han enfonsat.

En altres indrets es veuen *rupes*, visibles amb llum rasant com a esglaons a la superfície lunar. Poden tenir uns quants centenars de metres d'alçada i una longitud de més de 100 km. El pendent mai és vertical i generalment és inferior a 45°. Les *rupes* corresponen a falles (Wilhelms, 1987) que poden tenir una gènesi semblant a la de les *rimae*.



**Figura 8:** *Rimae* Prinz, *rimae* sinuoses. El cràter mig enterrat per les laves del *mare* és el cràter Prinz, el cràter prominent de la dreta de la imatge és el cràter *Aristarchus*, i l'enterrat de darrera a la vora dreta de la imatge és el cràter *Herodotus*. Les *rimae* de l'esquerra de la imatge són les *Rimae* Prinz, les de la dreta les *Rimae* *Aristarchus*. Aquesta imatge fou presa per l'Apollo XV. (NASA/Cortesia de nasaimages.org).

**Figure 8:** *Rimae* Prinz, *rimae* winding. The crater half buried by lava from the *crater* Prinz *mare* is the prominent crater on the right image is the crater *Aristarchus*, and buried behind the right side of the image is the crater *Herodotus*. The *rimae* the left of the image are *Rimae* Prinz, the right of the *Aristarchus* *Rimae*. This image was taken by Apollo XV. (NASA/Courtesy of nasaimages.org).





**Figura 9:** Rima Ariadaeus, rimae lineals. Al centre de la imatge veim la Rima Ariadaeus, un exemple de rima lineal. El cràter al sud de la rima a l'esquerra de la imatge és el cràter Silberschlag. A dalt a la dreta de la imatge és veu una taca negra que és el fons del cràter Boscovitch. La foto fou presa per l'Apol·lo X. (NASA/Cortesia de nasaimages.org).

**Figure 9:** Rima Ariadaeus, rimae linear: In the center of the image we see the Ariadaeus Rima, an example of linear rima. The crater south of the rima in the left image is the crater Silberschlag. Top right image voice is a black spot that is the bottom of the crater Boscovitch. The photo was taken by Apollo X. (NASA/Courtesy of nasaimages.org).

## Doms

Estan formats per turons arrodonits, de vegades amb un cràter al cim (Fig. 10). Poden tenir un diàmetre de devers 10 km i una alçada inferior als 1000 m. Es creu que poden correspondre a volcans extingits (Wilhelms, 1987), o bé altiplans volcànics. No es veuen traces de colades de lava, segurament degut a la seva antiguitat.

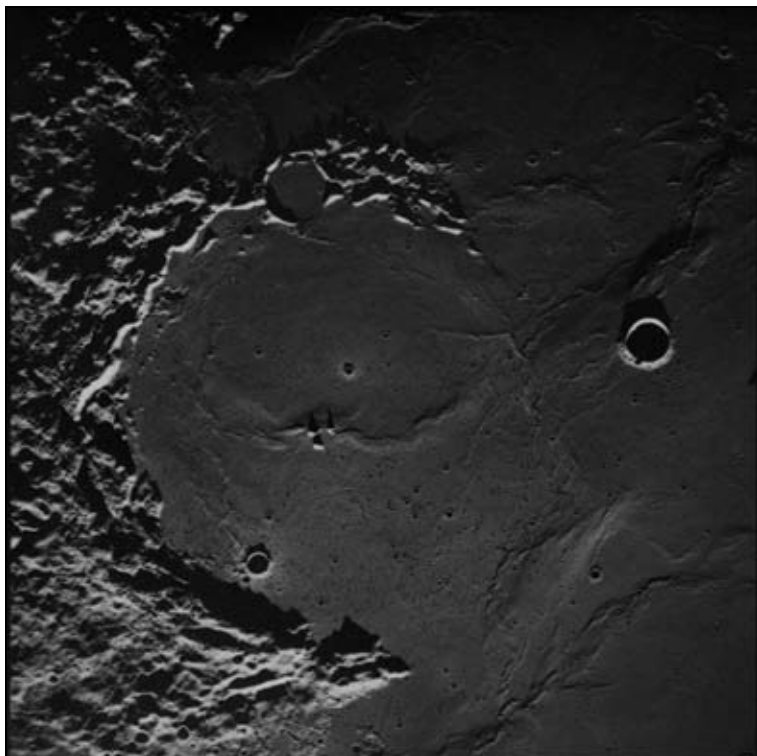
**Figura 10:** Mons Rümker, dom. El Mons Rümker és un exemple de dom que s'aixeca sobre l'Oceanus Procellarum. Imatge presa per l'Apol·lo XV en òrbita lunar. (NASA/Cortesia de nasaimages.org).

**Figure 10:** Rümker Mons, dome. The Mons Rümker is an example of dome that rises above the Oceanus Procellarum. Image taken by Apollo XV in lunar orbit. (NASA/Courtesy of nasaimages.org).



### *Dorsa*

Els basalts dels *maria*, de vegades, es troben recorreguts per unes estructures formades per relleus suaus i molt allargats anomenats *dorsa* (en singular *dorsum*; Fig. 11), que ocasionalment formen sistemes ramificats. En la literatura anglosaxona les *dorsa* també s'anomenen *mare ridges*. La seva alçada pot arribar a fer un centenar de metres, mentre que la longitud pot arribar a uns quants milers de quilòmetres. Es creu que es deuen a la subsidència experimentada al terreny a causa del refredament de les laves dels *maria* (Wilhelms, 1987).



**Figura 11:** *Dorsa* dins del cràter Letronne. La foto fou creada a partir d'imatges cartogràfiques de l'Apol·lo XVI en òrbita lunar. (NASA/Cortesía de nasaimages.org).

**Figure 11:** *Dorsa* into the Letronne crater. The photo was created from images of cartographic Apollo XVI in lunar orbit. (NASA/Courtesy of nasaimages.org).

## Història geològica de la Lluna

### Datacions relatives i absolutes: peculiaritats de la Lluna

Per datació relativa entenem situar cronològicament un esdeveniment en relació a altres esdeveniments. En geologia els esdeveniments als que ens referim són aquells que han deixat algun rastre, que pot ser material (cos de roques sedimentàries o ígnies), estructural (plecs, falles, esquistositat, etc.), geomorfològic (diverses formes d'erosió o d'acumulació) o bé transformacions químiques o minerals (diagènesi o metamorfisme). En l'estudi de la Lluna els esdeveniments observables seran normalment aquells que han deixat alguna morfologia observable sobre la superfície lunar (cràters, materials expulsats per l'impacte, cossos de roques volcàniques).

També existeixen maneres de datar un determinat fet, expressat en anys que han transcorregut entre aquest fet i el present, en aquest cas parlem de datació absoluta. Encara que hi ha molts mètodes per datar absolutament, els més utilitzats són aquells que es basen en



mesurar la disminució d'un determinat isòtop radioactiu en una roca o un mineral, i l'augment de l'isòtop en el qual es transforma. Aquesta és la tècnica de datació amb radioisòtops. Els més usats per a la datació de mostres lunars són els de rubidi-estronci, argó-argó i samari-neodimi. S'ha de tenir en compte que, de vegades, diversos mètodes de datació amb radioisòtops poden donar edats diferents, això succeeix perquè quan la roca o el mineral s'escalfen es pot posar a zero el comptador d'edats, però cada mètode té la seva temperatura de posada a zero. Així una roca que s'ha escalfat, per un metamorfisme per exemple, pot donar l'edat del metamorfisme amb un mètode de datació i una més antiga, la de formació de la roca original abans del metamorfisme.

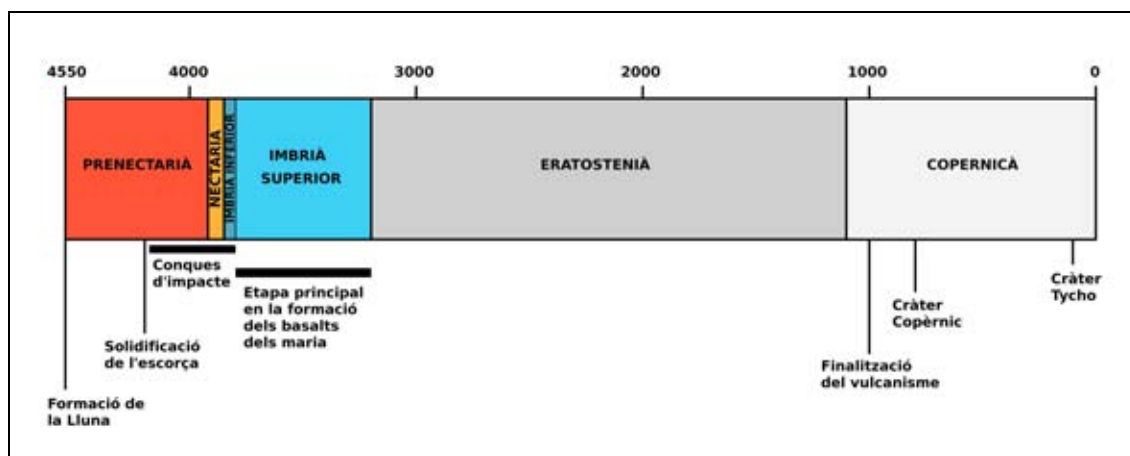
Per a la geologia lunar es tenen en compte els principis de datació relativa, especialment el principi de superposició d'Steno, que diu que en cas que observem diversos cossos de roques sedimentàries superposats un amb l'altre, el que se situa per sobre estratigràficament és el més modern i el de davall és el més antic, sempre i quan no hi hagi inversions de la sèrie estratigràfica per deformació tectònica. Com que a la Lluna no hi ha hagut una tectònica activa des de que es té registre geològic, el principi de superposició és pot aplicar pràcticament sempre. Els cossos sedimentaris que trobam a la Lluna quasi sempre estan produïts per l'emplaçament de materials expulsats pels impactes meteorítics. Aquests són identificables per mètodes fotogeològics i pot veure's quin se situa per sobre i quin per davall (Wilhelms, 1987).

Un altre principi per a la datació relativa és veure quines estructures tallen a les altres. Evidentment les estructures tallades són les més antigues i les que tallen són les més modernes. Referint-nos als cràters que són les estructures més omnipresents a la Lluna: els cràters que tenen altres cràters més petits als seu interior són més antics que en els cràters interiors; el cràter que talla és més modern que el que és tallat; el material ejectat per un cràter que s'emplaça per sobre d'un l'altre material ejectat per un segon cràter, indica que el primer cràter és el més modern (principi d'estratigrafia lunar, Wilhelms, 1987); el cràter més modern és el que té l'aspecte més "fresc" (fons més clar, rajos clars ben visibles, vores sense erosionar, fons sense cobrir per altres materials).

Els mètodes de datació relativa ens diuen quins cossos o estructures són els més moderns i quins els més antics, però no diu res sobre la separació temporal entre els esdeveniments, però a la geologia lunar s'han pogut datar roques amb radioisòtops, cosa que ha permès calibrar altres mètodes que s'han pogut usar per fer datacions absolutes. El més utilitzat és la datació per la densitat de cràters. El principi és senzill, les zones més densament cobertes de cràters són les més antigues i les menys cobertes les més modernes. Se suposa que els cràters s'han anat formant per igual a tota la superfície lunar i que la densitat de cràters que presenta una zona només depèn de la seva edat. En principi sembla un mètode per datar relativament una superfície però si tens terrenys que han pogut ser datats amb mètodes de datació absoluta es converteix en un mètode de datació absoluta, ja que totes les superfícies que tinguin la mateixa densitat de cràters tendran la mateixa edat. Per poder-se aplicar s'ha de tenir en compte que hi ha una edat a partir de la qual ja s'haurà donat la saturació i no s'obtiniran edats superiors a mida que passi el temps perquè el nombre de cràters que es crei serà igual al que es destrueixi. El principi de datació pel nombre de cràters es troba més explicat a Wilhelms (1987) i a Anguita i de la Casa (1995), on ho expliquen amb exemples pràctics.

### Taula dels temps geològics de la Lluna

Basant-se en la formació de les grans estructures lunars i en la datació de les mostres dutes a la Terra s'ha dividit l'edat de la Lluna en cinc períodes: Preneectarià, Nectarià, Imbrià, Eratostenià i Copernicà (Wilhelms, 1987). Al seu torn l'Imbrià (el tercer període) s'ha dividit en dues èpoques (Fig. 12).



**Figura 12:** Taula dels temps geològics de la Lluna, basat en Wilhelms (1987).

*Figure 12: Geologic time scale of the Moon, based on Wilhelm (1987).*

## El Preneectarià

La història de la Lluna comença en el Preneectarià amb la formació d'aquest astre fa 4550 milions d'anys (Wilhelms, 1987). Durant aquest període es formà l'escorça lunar, amb una composició en la qual predominava el feldspat càlcic (anortita), amb un gruix mitjà de 75 km, diferenciada del mantell lunar de composició ultramàfica. Es creu que es formà un oceà global de magma a la Lluna a partir del qual cristal·litza l'escorça feldspàtica formada per la diferenciació magmàtica, com ja s'ha explicat abans. Aquesta diferenciació acabà entre fa 4400 i 4200 milions d'anys, potser no per tot al mateix temps. El període finalitzà amb la formació de la conca del *Mare Nectaris*, amb una edat estimada de 3920 milions d'anys, durant doncs 630 milions d'anys.

Aquest període està marcat pels impactes meteorítics que modelaren profundament la superfície lunar. Generaren una bretxa, amb mostres d'haver sofert una fusió parcial, rica en elements sideròfils que constitueixen els dipòsits d'aquesta edat. S'han recopilat mostres d'aquest període, encara que s'ha estudiat més intensament pels estudis fotogeològics. Els grans impactes generaren trenta conques d'impacte, de les quals les *Procellarum* i Aitken del Pol Sud són les més grans. Entre els dos excavaren material del 40% de l'àrea de la Lluna (Wilhelms, 1987). Pot veure's l'edat relativa de les conques d'impacte per la densitat de cràters i per la seva superposició. Els materials ejectats de les conques més antigues són obscurs, mentre que els de les més joves presenten estructures i cràters secundaris com les conques del Nectarià i de l'Imbrià. La seva distribució espacial sembla ser a l'atzar. L'estructura cortical que deixaren els grans impactes condicionaren l'aparició del vulcanismes lligat als *maria* i la tectònica, ja que variaren el gruix de l'escorça i les fondàries a les que es trobaven les fonts del magma mantèlic.

Sobre l'edat absoluta d'aquestes conques d'impacte es tenen dubtes ja que hi ha poques datacions. També perquè hi ha ambigüitat sobre l'extrapolació de les freqüències dels cràters, ja que hi pot haver saturació i els diàmetres dels grans cràters són incerts.

En el Preneectarià també es formaren roques volcàniques (Wilhelms, 1987), probablement moltes estan interestratificades amb els dipòsits dels impactes. El vulcanisme preneectarià és molt més difícil de veure per l'espectacular deposició de les bretxes d'impacte. No s'han observat estructures tectòniques d'aquest període. La litosfera probablement es va anant engruixint.

## El Nectarià

El Nectarià començà amb la formació de la conca d'impacte Nectaris, i del material expulsat per l'impacte que la generà que constitueix la formació Janssen, amb una edat estimada de 3920 milions d'anys, i acabà amb la formació de la conca d'impacte *Imbrium*, amb una edat de 3850 milions d'anys, i durà 70 milions d'anys (Wilhelms, 1987). Durant aquest període es formaren entre 10 i 12 conques d'impacte, entre les quals destaquen la conca *Crisium*, la *Serenitatis* i la *Nectaris*. Les conques dubtoses són la conca Mendel-Rydberg, que pot ser prenectariana i la de Sikorsky-Rittenhouse que potser no sigui una conca d'impacte. Assumint que hi ha 11 conques d'impacte d'aquest període i que durà 70 milions d'anys implicaria una relació de formació de conques de 0,157 per milió d'anys, extrapolat al nombre de cràters per a tota la Lluna implicaria que existeixen uns 1330 d'entre 30 i 300 km de diàmetre, això són 19 cràters per milió d'anys. Tot això ha donat força a la teoria del *cataclisme meteorític terminal*. Segons aquesta teoria al Nectarià la Lluna rebé molts impactes, concentrats en un període de temps molt curt, en relació amb les etapes finals del Prenectarià. De totes formes, segons Wilhelms (1987), les conques d'impacte es podien haver format en grups per l'efecte d'un projectil que es desfà en diversos trossos (Wetherill, 1981) i mantenir òrbites temporals abans d'impactar.

Es tenen dades aïllades sobre clastes volcànics que podrien ser nectarians o prenectarians, però encara no es tenen dades concloents sobre el vulcanisme d'aquesta edat.

## L'Imbrià inferior

El període Imbrià, començà amb la formació de la conca d'impacte *Imbrium*, i amb el material expulsat per l'impacte que constitueix la formació Fra Mauro, amb una edat de 3850 milions d'any, datats amb mostres obtingudes per les missions espacials Apol·lo XIV i Apol·lo XV, i finalitzà fa 3200 milions d'anys (l'edat entremig de les mostres més antigues recollides per l'Apol·lo XV i les més modernes recollides per l'Apol·lo XII). El període Imbrià es divideix en dues èpoques, amb característiques geològiques ben diferenciades: l'Imbrià inferior, que durà uns 50 milions d'anys i finalitzà fa 3800, i l'Imbrià superior que durà 600 milions d'anys i finalitzà fa 3200 milions d'anys (Wilhelms, 1987).

L'Imbrià inferior fou una època marcada pels grans impactes que deixaren grans conques d'impacte. La primera que és formà (conca *Imbrium*) és la més grossa del període i la tercera més grossa de la Lluna després de la *Procellarum* i l'Aitken del pol Sud. La conca *Imbrium* va aixecar anells muntanyosos que són els més alts de la Lluna, llevat dels de la conca Aitken del pol Sud. Els materials llençats per l'impacte arribaren a quasi tota la cara visible i part de la cara oculta de la Lluna. L'ejecta primari gruixat d'aquest impacte es va disposar a uns quants centenars de quilòmetres de la conca i alguns arribaren a més de 1000 km de la vora. Moltes zones planes cobertes amb materials de colors clars, corresponen a ejecta primari i secundari. Els cràters secundaris possiblement arribaren fins a les antípodes de l'impacte. Aquest impacte ha pogut ser datat absolutament per les mostres recollides per l'Apol·lo XIV que consistien en bretxes riques en KREEP cobertes per la formació Fra Mauro, relacionada amb la formació del *Mare Imbrium*, i per les mostres de l'Apol·lo XV que consistien en bretxes dels *Montes Apenninus*. Les dues coincideixen en donar una edat de 3850 milions d'anys. La conca *Imbrium* és el lloc on es troba el major volum preservat de basalts dels *maria*.

L'altra gran conca d'impacte de l'Imbrià inferior és la *Orientale*, que es formà 50 milions d'anys posteriorment a la *Imbrium*, i tanca aquesta època així com l'era dels grans impactes. De fet la conca *Orientale* és la més moderna i la més ben preservada de les conques d'impacte, cosa que fa que es pugui utilitzar com a model per interpretar les altres conques d'impacte. Relacionada amb l'impacte que generà la conca *Orientale* es troba la formació *Hevelius*.

Quan al vulcanisme, degut a la curta durada d'aquesta època no se'n tenen molts de registres. La mostra més antiga rica en potassi i titani recollida al subsòl per la missió de l'Apol·lo XI pot ser d'aquesta edat.

### L'Imbrià superior

La segona època del període Imbrià començà fa 3800 milions d'anys i acabà fa 3200 milions d'anys i marcà un canvi de tendència en la història de la Lluna (Wilhelms, 1987). Passam d'una història geològica marcada pels grans impactes i per la creació de les grans conques d'impacte a una altra marcada pel vulcanisme. Aquest vulcanisme, amb tota probabilitat ja havia començat abans de l'Imbrià superior, però serà en aquesta època on assoleix el seu màxim protagonisme en la formació geològica del nostre satèl·lit. La major part de les unitats visibles dels basalts dels *maria* tenen aquesta edat (Wilhelms, 1987). A més, basalts d'aquesta edat constitueixen part de tots els *maria* més extensos. Els basalts de l'Imbrià superior són els materials més mostrejats per les diverses missions lunars. Les erupcions que donaren lloc als basalts són freqüents durant tot l'Imbrià superior encara que van disminuint en volum al llarg de l'època. Cap al final d'aquesta també s'han datat erupcions que produïren material piroclàstic.

Quant a la formació de cràters, durant l'Imbrià superior la relació de formació de cràters majors de 30 km de diàmetre amb el temps fou de 0,28/milió d'anys, cosa que suposa només un 1,5% de la velocitat de formació de cràters del Nectarià, la de l'Imbrià inferior seria intermèdia entre els dos valors, suportant la idea que es va produir una disminució progressiva de la velocitat de formació de cràters (Wilhelms, 1987).

### L'Eratostenià

El període Eratostenià agafa el nom del cràter Eratòstenes que es pren com a model de cràter d'aquesta edat. Com ja hem dit abans, l'Eratostenià no comença amb un impacte que afecti tot el globus lunar. S'agafa convencionalment l'edat de 3200 milions d'anys (intermèdia entre la de les mostres més antigues recollides per l'Apol·lo XV i la de les mostres més modernes recollides per l'Apol·lo XII). En general els períodes Eratostenià i Copernicà es basen més en criteris observacionals. Aquests dos extensos períodes es caracteritzen per la poca abundància de laves basàltiques i per mostrar una modificació de la superfície lunar basada quasi únicament en els impactes meteorítics. Els cràters eratostenians serien els que tenen aspecte recent però menys que els copernicans. Un dels criteris és que els cràters formats durant l'Eratostenià tenen els rajos d'ejecta i el fons poc brillants i pocs marcats degut a l'enfosquiment per radiacions i pluja meteorítica. Un altre criteri es dona fotografiant els cràters en infrarojos durant els eclipsis de Lluna, els cràters eratostenians apareixen "freds" mentre que els copernicans apareixen com a "calents" (Wilhelms, 1987). Seguint el criteri de Wilhelms (1987) de considerar que els impactes meteorítics s'han mantingut constants des de fa 3200 milions d'anys, el període Eratostenià arriba fins fa 1100 milions d'anys. Duraria així 2100 milions d'anys, seria el període més extens de la història lunar i abastaria quasi la meitat de la seva existència.

El vulcanisme continuà durant l'Eratostenià, generant fluxos extensius a l'*Oceanus Procellarum* i al *Mare Imbrium*, i de forma menys extensa a altres mars. Aquest vulcanisme generà basalts que s'han datat absolutament amb mostres de quatre tipus composicionals que representen almanco tres colades diferents, i que foren recollides per l'Apol·lo XII, donaren edats de 3160 milions d'anys.

Segons sembla al final de l'Imbrià quedaren escombrats la majoria de cossos capaços de produir grans cràters i conques d'impacte, i només quedaren cossos com els que encara resten en el Sistema Solar.

## El Copernicà

El període Copernicà pren el nom del cràter Copèrnic que és el que s'agafa com a model dels cràters d'aquesta edat. Com ja hem explicat abans, no està clara la divisió entre l'Eratostenià i el Copernicà, encara que es pot prendre l'edat de 1100 milions d'anys com a l'inici d'aquest període (Wilhelms, 1987). El Copernicà acaba en l'actualitat. És en el que es troben les estructures més ben preservades i que serveixen de model per interpretar les estructures antigues. Els processos que s'originaren durant el Copernicà serien "recents" per a la història de la Lluna, sempre que puguem considerar que un fet que tengué lloc fa més de 1000 milions d'anys sigui recent.

Només es coneixen unes poques zones cobertes amb laves d'aquesta edat. Aquestes són alguns punts al solc entremig de l'*Oceanus Procellarum*, que també són zones d'aparició preferencial de laves de l'Eratostenià (Wilhelms, 1987). El vulcanisme copernià és, doncs, un vulcanisme residual que acaba just al començament del període. La desaparició del vulcanisme estaria relacionada amb el refredament de la Lluna i amb l'engruiximent de l'escorça lunar. Les úniques parts de la Lluna que encara poden estar fuses són les que donen terratrèmols profunds (aproximadament entre els 1000 i els 800 km de fondària). Els cràters més representatius d'aquest període són Copèrnic que té una edat discutida de 800 milions d'anys, i Tycho amb una edat segurament acurada de 100 milions d'anys. És a dir Tycho, que és un dels cràters més recents que es poden veure amb tota facilitat pels afeccionats a l'astronomia es va originar quan els dinosaures encara es passejaven per sobre de la Terra.

## Activitat geològica actual a la Lluna

Actualment la Lluna es considera un astre pràcticament mort des del punt de vista geològic. No obstant això, els sismòmetres col·locats per les missions Apol·lo han detectat "tremolors de Lluna" que no superen el grau 2 de l'escala de Richter. L'escorça lunar sòlida supera els 60 km de gruix i el mantell arriba fins als 800 km de fondària. Tots aquests sismes només s'han detectat en l'hemisferi proper a la Terra. Aquesta asimetria pot deure's al fet que es trobin lligats a les marees internes produïdes per la Terra. També hi ha la possibilitat que aquesta asimetria sigui només aparent i que es donin sismes a la cara oculta de la Lluna que no es detectin degut a la presència d'un nucli fus que impedeixi el pas de les ones (Anguita, 1988). Aquesta qüestió només es podrà resoldre instal·lant sismòmetres a la cara oculta, ja que els que es posaren sobre el nostre satèl·lit per les missions Apol·lo només es localitzen a la cara visible.

L'activitat volcànica selenita té, en la major part, més de 3000 milions d'anys. Durant el període Eratostenià va perdurar una certa activitat volcànica que s'aturà definitivament fa 1000 milions d'anys. Això ens du a afirmar que la Lluna és un astre fred sense restes d'activitat interna, però sorprenentment en les missions lunars es va mesurar un flux tèrmic apreciable, del mateix ordre que el registrat als continents terrestres (Anguita, 1988). Ja que les anortosites i els gabres contenen menys elements radioactius productors de calor que els granits que formen l'escorça terrestre, a la Lluna han d'existir més fonts de calor en fondària, cosa que dona suport a la idea d'un nucli intern fus.

Una cosa que no sorprengué els geofísics que prengueren mesures a la Lluna fou que el camp magnètic lunar era pràcticament inexistent, tal com va detectar la sonda espacial Surveyor. La inexistència d'un camp magnètic és consistent amb una Lluna geològicament morta. El que sí fou sorprenent va ser trobar un registre paleomagnètic a les roques dutes a la Terra per les missions Apol·lo. A l'època en què es produir la major part de l'activitat volcànica que cobrí els *maria* la Lluna va tenir un camp magnètic d'una intensitat quasi un deu per cent de l'actual camp terrestre (Anguita, 1988). La presència d'un camp magnètic d'aquesta època no és difícil d'explicar, ja que la Lluna es fongué al moment de la seva acreció i hi podia haver un nucli originat en aquella època que generàs un efecte dinamo productor d'un camp magnètic.

Com ja hem apuntat anteriorment, les diferències sobtades i extremes de temperatures poden tenir efectes sobre la superfície lunar. Com que la Lluna no té atmosfera que intercepti la radiació solar, l'energia irradiada pel Sol arriba amb tota la seva intensitat. A més com que la Lluna té un albedo baix, absorbeix la major part d'aquesta energia. L'efecte és un escalfament elevat durant el dia i un refredament durant la nit. Les temperatures superficials diürnes poden arribar a 100°C, mentre que les nocturnes poden assolir els -173°C (Strahler, 1992). Per l'efecte d'un eclipsi de Lluna s'han mesurat davallades de temperatura des de 71°C fins a -79°C en tan sols una hora (Strahler, 1992). Aquesta reducció de 150°C és molt major que la que es pot trobar a la superfície terrestre en un temps comparable. Aquestes variacions tèrmiques poden tenir efectes significatius sobre els materials selenites. L'expansió i la contracció experimentades poden ocasionar la ruptura de roques sòlides en partícules petites. Els canvis volumètrics també poden provocar que les partícules soltes reptin gradualment a nivells inferiors de la superfície inclinada. Aquests efectes poden ser molt importants en la superfície lunar, ja que els agents meteòrics no produeixen efectes de meteorització, erosió ni transport. Evidentment els canvis experimentats a la Lluna són molt més lents que els terrestres.

Evidentment un dels agents que encara afecten la superfície lunar són els impactes meteorítics. Segons Ruíz (2001) els primers esclats de llum produïts per impactes meteorítics a la Lluna detectats sense ambigüitats es detectaren el 18 de novembre de 1999. Aquests impactes es coneixien pels innombrables cràters que cobreixen el nostre satèl·lit, i se sabia segur que se seguien produint. També hi havia constància que ocasionalment s'havien detectat lluïssors a la Lluna però mai s'havia pogut confirmar que es devien a impactes meteorítics. Frederick W. Herschel en podria haver observat algun. Així com també els sismòmetres instal·lats a la Lluna havien detectat moviments sísmics que quasi amb total certesa es devien als impactes, però no es comptava amb cap registre òptic. Aquests impactes podrien haver estat produïts per fragments del cometa 55P/Tempel-Tuttle (Ruíz, 2001), que a la Terra produeixen pluges de meteors anomenades Leònides.

També cal mencionar els *zap pits*, que com ja hem explicat abans són foradets de menys d'1 mm de diàmetre, envoltats per vidre i formats per microimpactes. Això suposa una mena de procés erosiu que funciona sobre la superfície actual de la Lluna (Strahler, 1992).

Com ja s'ha mencionat anteriorment, el bombardeig continuat del vent solar format bàsicament per protons i electrons, durant milers de milions d'anys, ha afectat profundament la regolita lunar (Smoluchowski, 1986). Aquest bombardeig ha anat obscurint la superfície del nostre satèl·lit, i això produeix un albedo molt baix, amb una reflectivitat comparable a la del carbó. També fa que les partícules fines, que queden ionitzades, es vagin adherint entre elles, cosa que donà molts problemes als astronautes i als equips tecnològics que s'emplaçaren sobre la superfície lunar. Una conseqüència d'això és que els impactes meteorítics i els materials que mobilitzen es vegin blancs, ja que exposen materials que no han sofert aquesta acció d'enfosquiment. També cal destacar que les partícules del vent solar, poden ser valuoses per elles mateixes ja que poden ser aprofitables com a recurs mineral per a l'obtenció d'hidrogen, que abans de la trobada d'aigua a la Lluna es veien com a l'única font explotable d'aquest element (Romero i Crespi, 1992).

## La Lluna i altres cossos planetaris

### La Lluna i la Terra

L'estudi de la Lluna ha permès conèixer millor la història geològica dels planetes de tipus terrestre. En concret els estudis lunars ens han possibilitat de saber que va passar als primers temps de la història terrestre. S'ha de tenir en compte que les formacions rocalloses més

antigues de la Terra tenen una edat aproximada de 3800 milions d'anys (tot i que hi ha minerals que ens indiquen que anteriorment a aquesta edat hi hagué una escorça sòlida envoltant la Terra). Quasi tots els indicis del que succeí a la Terra abans dels 3800 milions d'anys es deu a l'estudi de la Lluna. Com ja hem vist abans, la Lluna compta amb una gran quantitat de registres litològics i estructurals anteriors als 3800 milions d'anys (períodes Prenectarià, Nectarià i època Imbrià inferior). Aquesta època es va caracteritzar pels grans impactes, per aquest motiu a la Terra l'era equivalent que correspondria a aquests períodes s'ha anomenat Hadeà, derivat d'Hades que significa infern en grec, degut a que la Terra, com la Lluna, es degué veure afectada per grans impactes com els que canviaren la superfície del nostre satèl·lit.

Gràcies al coneixements que tenim sobre la història geològica de la Lluna hi ha tres grans fets dels quals en tenim evidències. El primer és la formació de la mateixa Lluna. Avui en dia sembla que la teoria més probable sobre els seu origen és la del gran impacte que volatilitzà una part del mantell terrestre i que donà lloc a la matèria que envoltaria la Terra i que s'acabaria ajuntant per formar el satèl·lit. L'única prova que tenim d'aquest impacte és l'existència de la mateixa Lluna, que ens informa de com hagueren de ser de catastròfics i caòtics els primers temps del Sistema Solar. L'altre gran fet testimonià per la Lluna és l'existència d'un oceà de magma que cobrí tota la seva superfície, aquest fet es coneix des dels temps de les missions Apol·lo però s'ha vist confirmat per la missió Lunar Prospector de finals dels anys noranta (Spudis, 2008). Probablement l'oceà de magma s'originà per la ràpida acumulació de fragments arrencats a la Terra en el gran impacte, i desconexim si també es donà a la Terra un oceà de magma equivalent al de la Lluna, ja que no en tenim proves directes. El tercer fet són els grans impactes que afectaren a la Lluna entre el moment de la solidificació de la seva escorça fa uns 4200 milions d'anys i l'acabament de l'Imbrià inferior fa 3800 milions d'anys, que sens dubte també es donaren a la Terra. Si es confirmàs la teoria del "gran cataclisme terminal" de la Lluna fa uns 4000 milions d'anys hauríem de pensar que aquest també pogué afectar el nostre planeta.

## La Lluna i Mercuri

L'estudi de la geologia lunar també ens ha permès interpretar millor la superfície del planeta Mercuri. No es coneixia molt de la superfície d'aquest planeta abans de l'era espacial, ja que no es donen mai bones condicions d'observació des de la Terra. Mercuri sempre es veu a prop del Sol i molt proper a l'horitzó quan es fa de nit. La nau Mariner 10 fou la primera que permeté obtenir imatges detallades de la seva superfície (Murray, 1975), que ens mostraren que el planeta més proper al Sol tenia una superfície molt similar a la de la Lluna (Fig. 13). La superfície de Mercuri està coberta de cràters com la Lluna, i també hi podem veure grans conques d'impacte com les lunars, la més grossa és la conca *Caloris*. Es pensa que l'edat dels grans cràters de Mercuri podria ser la mateixa que els lunars, amb una etapa de formació principal entre els 4000 i els 3000 milions d'anys d'antiguitat. Els cràters més moderns tenen rajos com els de la Lluna. En alguns terrenys es troben planes de relleus suaus que poden comparar-se als *maria* lunars, com les que omplen la conca *Caloris*, que formen el *Mare Caloris*. A diferència del que passa a la Lluna que els *maria* són molt més foscs que les terres circumdants, les planes de Mercuri tenen una foscor molt semblant al seu entorn. Aquest fet podria ser explicat si les laves que omplen les grans conques de Mercuri contenen laves amb menys ferro que les lunars (Murray, 1975).

De totes formes també hi ha diferències entre les característiques de Mercuri i les de la Lluna. Mercuri té un camp magnètic apreciable, inferior al terrestre (1% del camp magnètic de la Terra en superfície), però molt superior als de Venus, Mart i la Lluna. Aquest fet fou molt sorprenent ja que se suposava que els planetes i satèl·lits geològicament morts tampoc tendrien una dinàmica al nucli que permetés l'existència d'un camp magnètic. A més a més la rotació de Mercuri és molt lenta per poder explicar la presència d'aquest camp magnètic, per la teoria que

s'utilitza per explicar el terrestre. Encara no es té una teoria satisfactòria per explicar el camp magnètic de Mercuri, però la majoria dels autors consideren que Mercuri ha de tenir un nucli fus.



**Figura 13:** Foto de Mercuri en fals color, obtinguda per la sonda Messenger. (Foto de la NASA, Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Carnegie Institution of Washington).

*Figure 13: Photograph of Mercury in false color, obtained by the Messenger probe. (Photo from NASA, Johns Hopkins University Applied Physics Laboratory, Carnegie Institution of Washington).*

El que sembla clar és que Mercuri té un gran nucli metàl·lic. Ja que a més de camp magnètic la densitat del planeta és molt superior a la de la Lluna, amb un valor de 5,5 g/cm<sup>3</sup>. Es creu que el nucli de Mercuri té un radi de  $\frac{3}{4}$  del radi planetari.

A les antípodes de les grans conques d'impacte de Mercuri, com la conca *Caloris*, es troben terrenys muntanyosos amb solcs que es pensa que poden estar formats per la focalització dels efectes sísmics provocats per l'impacte que originà la conca. Aquests terrenys no s'han observat a la Lluna.

Una altra característica de Mercuri que no s'observa a la Lluna són els “declivis lobulats” que corresponen a alineacions de relleus retallats i poc profunds que s'estenen per centenars de quilòmetres en longitud. Aquests relleus s'interpreten com a produïts en un episodi primerenc de contracció de l'escorça a escala global. El fet que no es produeixin ni a la Lluna ni a Mart fa pensar que hi hagué un episodi de refredament lent i posterior contracció de l'escorça lligada al refredament del nucli.

És d'esperar que la nova missió Messenger, que arribà a Mercuri el 2008 i que es posarà en òrbita del planeta al 2011 per cartografiar-lo completament, canviarà el nostre coneixement sobre la geologia mercuriana.

Comparant les característiques geològiques de Mercuri amb les de la Lluna se'ns presenten una sèrie de qüestions encara no resoltes (Murray, 1975):

- Pertanyen els objectes causants d'impactes de la superfície de Mercuri a la mateixa família que els que bombardejaren la Lluna?
- Passà cada un dels planetes interiors (Mercuri, Venus, la Terra i Mart) i la Lluna per períodes distints de bombardejos que se superposaren, o bé no coincideixen en absolut acabant cada un de manera brusca i independent?

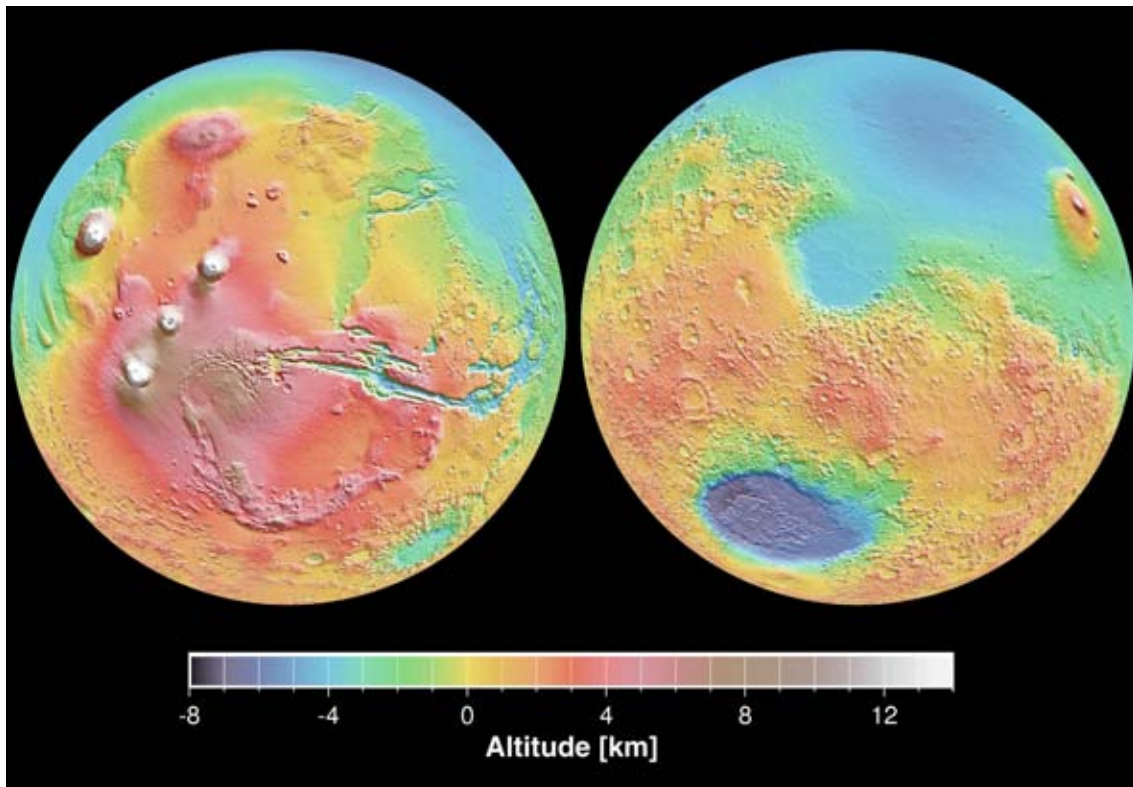


- Va veure's Mercuri afectat per un "cataclisme meteorític terminal" com el que es pensa que pogué donar-se a la Lluna?

Totes aquestes qüestions que es plantegen sobre el planeta més proper al Sol només podrien resoldre's realitzant anàlisis i datacions absolutes dels terrenys de Mercuri.

## La Lluna i Mart

Abans de l'era espacial Mart era vist com un planeta en el qual les característiques superficials eren molt semblants a la Terra. Les observacions que s'havien fet des del nostre planeta semblaven confirmar-ho ja que té estacions, els dies marcians tenen una durada similar als terrestres, té atmosfera i posseeix casquets polars que canvien amb les estacions, cosa que feia suposar que durant el desgel hi hauria aigua líquida sobre la superfície del planeta roig.



**Figura 14:** Imatge de Mart obtinguda per la Mars Orbital Laser Altimeter (MOLA) en què el color indica l'alçada del terreny als hemisferis occidental i oriental. A l'imatge de l'esquerra es veu l'hemisferi occidental dominat per la regió de Tharsis (vermell i marró), els volcans més alts apareixen en blanc, el *Valles Marineris* és la fossa que apareix a la dreta. A l'imatge de la dreta es veu l'hemisferi oriental, dominada per les terres altres fortament crateritzades (del groc al vermell) amb la conca Hellas (blau fosc/púrpura) a l'esquerra abaix. La província d'Elysium es troba a l'extrem superior dret. Les àrees situades al nord de la dicotomia apareixen de color blau als dos mapes. (Foto de la NASA/JPL).

**Figure 14:** Image of Mars from the Mars Orbital Laser Altimeter (MOLA) in which the color indicates the height of the terrain in eastern and western hemispheres. The image on the left is the Western Hemisphere dominated by the Tharsis region (red and brown), the highest volcano blank, Valles Marineris is the pit that appears to the right. The right image shows the eastern hemisphere, dominated by heavily cratered other lands (from yellow to red) with the Hellas basin (dark blue / purple) on the left below. The province of Elysium is located in the upper right. The areas in the north of the dichotomy appear blue to the two maps. (Photo from NASA / JPL).

La possible existència d'aigua líquida al planeta Mart fou i encara ho és un tema de profund debat ja que fa possible la presència de vida marciana. No coneixem totes les condicions en què es pot donar la vida, però una condició ineludible sembla ser l'existència d'aigua líquida.

La primera nau espacial que arribà a Mart i pogué enviar imatges fou la Mariner 4, que s'aproximà al planeta els dies 14 i 15 de juliol de 1965. Les imatges que envià causaren una decepció total entre els científics responsables de la missió, ja que s'esperava trobar un paisatge semblant al terrestre i el que es veié fou una superfície pareguda a la de la Lluna, totalment coberta de cràters d'impacte, alguns de centenars de quilòmetres de diàmetre. A més, com la Lluna, Mart no té camp magnètic, cosa que es relaciona amb l'absència d'un nucli metàl·lic fus. La pressió atmosfèrica no arriba a l'1% de la terrestre, i l'aire que envolta Mart està quasi exclusivament format per diòxid de carboni (no hi ha oxigen, el nitrogen és escàs i el vapor d'aigua es troba en quantitats ínfimes).

Missions posteriors demostraren que la zona retratada per la Mariner 4, encara que eren representatives d'una gran part de Mart no ens mostraven tota la complexitat geològica del planeta. A l'any 1971 la missió de la NASA Mariner 9 arribà al planeta roig enmig d'una forta tempesta. Fou la primera nau que l'orbità. Un mes després de l'arribada la tempesta es calmà i pogué enviar imatges de la seva superfície. Durant la tempesta es veieren quatre taques, que després es pogué veure que corresponien a quatre cràters de 70 a 80 km de diàmetre situats al cim de grans muntanyes (Raeburn i Golombek, 1998), s'havien descobert els primers volcans que es veren de Mart, i els primers en trobar-se al Sistema Solar fora de la Terra. Aquests volcans són l'*Olympus Mons* i els *Montes Tharsis*. L'*Olympus Mons* s'havia observat abans des de la Terra però es desconeixia que era un volcà, és el més gros que s'ha pogut veure en tot el Sistema Solar. A més a més, també va descobrir el gran canyó *Valles Marineris* i canals entrelaçats que podien haver estat formats per l'acció de l'aigua. Aquesta missió va tornar fer de Mart un planeta amb unes condicions més similars a les terrestres, en el qual hi podia haver existit aigua en el passat i on hagués estat possible l'existència de vida, almenys en el passat.

L'ambiciós projecte Viking de la NASA, que arribà a Mart al juliol de 1976 constava de dues naus, cadascuna amb un mòdul de descens i un orbital. El mòdul de descens va obtenir les primeres imatges preses des de la superfície planetària, molt semblants a les dels deserts més àrids de la Terra, la seva missió era investigar la possibilitat d'existència de vida marciana, amb resultats negatius, encara que algun dels experiments realitzats han obert debats que encara no s'han tancat. Mentrestant els mòduls orbitals prengueren les imatges més detallades de la superfície marciana obtingudes fins llavors.

Per a la pròxima missió que es realitzà a Mart es va haver d'esperar vint-i-un anys. Al juliol de 1997 arribà a Mart la Pathfinder, que obrí una nova era en la investigació del planeta roig. Ara l'objectiu no era tant veure les possibilitats d'existència de vida sinó investigar la geologia i la presència d'aigua, en tots els seus estats. La nau Pathfinder transportava un robot equipat per investigar la geologia marciana anomenat Sojourner. Segons Matt Golombek, el responsable científic de la missió, el Sojourner era un petit geòleg de 30 centímetres (Raeburn i Golombek, 1998). Al mateix temps que la missió de la Pathfinder arribà a Mart, al 1997 la nau Mars Global Surveyor, que funcionà durant quasi 10 anys, i que anava equipada amb un espectròmetre d'emissió tèrmica per tal de poder analitzar la composició mineralògica del planeta. Al 2001 arribà la Mars Odyssey equipada amb una càmera infraroja per observar la composició variable de les roques ígnies. Al 2004 arribà la Mars Express de l'ESA, equipada amb un espectròmetre infraroig per comprovar la composició mineral de les altres missions. A més, al 2004 arribaren a Mart dos robots, l'Spirit, al cràter Gusev, al final d'un sistema de canals, i l'Opportunity, al *Meridinani Planum*, en un punt triat per la gran concentració d'hematites detectada per la nau Mars Global Surveyor.

Les conclusions d'aquests programes d'exploració apunten al fet que Mart és un planeta amb característiques intermèdies entre la Terra i la Lluna. En general els planetes terrestres i la Lluna es poden agrupar en tres categories que depenen de la seva massa (Raeburn i Golombek, 1998). En primer lloc tenim Mercuri i la Lluna, que són cossos planetaris de mida i massa

petita, que han estat inactius durant milers de milions d'anys i la seva superfície està dominada per terrenys molt crateritzats, formats per impactes que tengueren lloc principalment durant els primers mil milions d'anys d'història del Sistema Solar. La Lluna conserva l'escorça original que es formà per la solidificació d'un oceà de magma, encara que hagi sofert modificacions. En segon lloc tenim els planetes terrestres grossos, que són la Terra i Venus. Aquests segueixen actius geològicament i han renovat continuament la seva superfície. Quasi totes les seves roques antigues han estat destruïdes per la seva dinàmica cortical. En canvi, Mart no encaixa en cap de les dues categories de cossos planetaris terrestres, és massa petit per ser com la Terra però massa gros per ser com la Lluna. Per a Mart s'ha de crear una categoria intermèdia. Té la mida justa per haver estat actiu durant tota la història del Sistema Solar, però no tant per haver esborrat el registre de la seva història antiga. S'han produït roques a Mart que contenen un registre complet de la història del Sistema Solar.

A Mart es poden diferenciar dos tipus de terreny (Raeburn i Golombek, 1998; Anguita, 1998). Els dos terços del sud del planeta està format per un terreny molt crateritzat, que és el que recorda més la superfície lunar i el que retrataren les primeres missions marcianes (Fig. 14). Aquest terreny es pot datar de manera aproximada amb el mètode de comptar cràters, utilitzat per a la datació de terrenys lunars. La densitat de cràters d'aquesta zona es troba entre la de les *terrae* i la dels *maria* lunars (Anguita, 1998). La seva edat se situa entre els 4000 i els 3500 milions d'anys. Aquest mètode de datació s'ha d'utilitzar amb més precaucions que per a la Lluna, ja que al nostre satèl·lit s'ha pogut ajustar amb datacions absolutes realitzades a les mostres retornades per les missions Apol·lo i Luna. Això no s'ha fet a Mart i l'única eina que tenim per datar és comparar amb la densitat de cràters lunars. Evidentment la certesa de datació a Mart no existeix ja que pot haver tengut una història d'impactes un poc diferent que la de la Lluna, a més l'activitat geològica als primers temps de la història del planeta roig pot haver esborrat cràters d'impacte. La missió Mars Global Surveyor va descobrir que aquests terrenys, com tot el planeta, estaven formats quasi totalment per feldspats, piroxens i olivina, que a la Terra i a la Lluna són minerals que constitueixen les roques volcàniques. Posteriorment la missió Mars Express de l'ESA confirmà que la composició de les roques antigues de les terres altes era la típica dels basalts, roca molt freqüent a la Terra i a la Lluna on forma les planes dels *maria*. En aquesta zona també es troben conques d'impacte, la més important és la Hellas de 2000 km de diàmetre, la segona de tot el Sistema Solar després de l'Aitken del Pol Sud de la Lluna.

El terç septentrional del planeta roig té pocs cràters d'impacte, cosa que, com ja sabem, ens informa de la seva joventut relativa (Fig. 14). En general aquest terreny es troba deprimat dos quilòmetres en relació a les zones antigues i crateritzades de Mart. El límit entre les dues zones segueix aproximament un cercle de 30 graus d'inclinació. En aquesta zona són freqüents els volcans, i també es troben planes formades pel rebliment amb roques volcàniques. L'edat dels volcans i de les planes volcàniques, obtinguda pel mètode del comptatge de cràters, és molt variable. La majoria daten de la primera meitat de la història del planeta (Christensen, 2008), encara que cap es remunta a l'edat de formació del planeta (Sagan, 1994). L'*Olympus Mons* té sols uns pocs centenars de milions d'anys i alguns relleus volcànics, com per exemple Cerberus, és formaren fa sols 200 milions d'anys (Sagan, 1994). Algunes regions com Athabasca no tenen cràters d'impacte, cosa que ens indica que són molt joves (Christensen, 2008). Les seves erupcions poden haver sorgit durant els darrers milions d'anys. No s'han observat signes de vulcanisme actiu ni punts calents geotèrmics amb les imatges infraroges nocturnes, el que s'ha pres com a una indicació que l'escorça marciana es troba refredada (Christensen, 2008).

La diferència d'alçada entre les dues regions i que la frontera entre elles sigui abrupte i amb morfologia més o menys circular fa pensar que els seu origen pugui estar relacionat amb un impacte, de manera anàloga a les conques circulars on s'ubiquen els *maria* lunars. Si fos així es tractaria d'una conca d'impacte de 7700 km de diàmetre. Però aquesta teoria es topa amb diversos problemes, el primer és que la vora de la zona nord no té una morfologia perfectament circular sinó que és bastant irregular. Com que el seu origen no està clar la majoria d'autors prefereixen anomenar-la dicotomia. Encara que les irregularitats en la forma de la vora podrien

relacionar-se amb l'erosió que ha sofert (Anguita, 1998), una altra possibilitat és que Mart experimentà una etapa (curta i antiga) de tectònica de plaques (Sleep, 1994). La dicotomia s'explicaria com a la vora d'una antiga placa litosfèrica antiga i la zona nord correspondria a una antiga zona d'escorça oceànica, equivalent a les que es troben a la Terra. Segons Sleep (1994), aquesta tectònica de plaques es donà fa 4000 milions d'anys i durà, tan sols, entre 100 i 200 milions d'anys. Aquesta teoria, òbviament, no està exempta de problemes. En primer lloc les profundes diferències que existirien entre la tectònica terrestre i la marciana, i en segon lloc la problemàtica que presenta el fet que s'iniciï una tectònica de plaques de manera tan brusca, i deixi de funcionar després d'un temps tan breu, són els principals inconvenients que es troben en aquesta teoria.

Quant a la composició mineralògica de la zona septentrional, tal com s'ha pogut observar amb la sonda Mars Express de l'ESA, s'observen zones amb composicions que s'assemblen més a les de l'andesita. Aquesta roca rep el nom de la serralada dels Andes a Sud-Amèrica. A la Terra, els basalts, que es formen pel magma que prové del mantell a les dorsals oceàniques, es transformen en roques formades per minerals més hidratats degut a que s'enriqueixen en aigua, per un procés anomenat metamorfisme de fons oceànic. Aquests basalts enriquits en aigua formen l'escorça oceànica que s'enfonsa al mantell a les zones de subsidència. L'escorça que subdueix aporta aigua al mantell i genera un tipus de magma característic que genera la lava andesítica. No coneixem perquè a Mart es donen andesites, potser provenen d'un mantell més humit, tal volta es deguin a unes condicions de pressió i temperatura diferents a les que originen els basalts, o potser les andesites que s'han observat a Mart en realitat són basalts alterats que donen l'aparença de ser andesites (Christensen, 2008). En altres zones com a *Syrtis Major* s'ha observat que la part central de les laves que formen els volcans tenen una composició basàltica mentre que les parts més laterals tenen una composició dacítica, cosa que suggereix una certa diferenciació magmàtica.

En general, des del punt de vista mineralògic i petrològic es pot dir que la superfície de Mart està governada pel vulcanisme i que, a diferència de la Lluna, és un planeta que està geològicament viu.

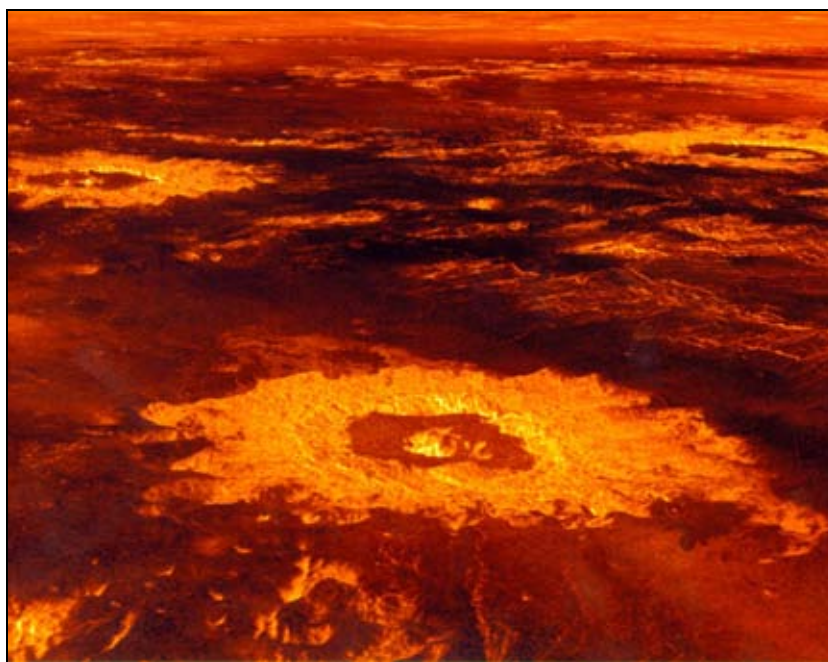
Una diferència destacable entre la geologia del planeta roig i la lunar és l'absència de cràters amb diàmetres inferiors als 50 m (Arvidson *et al.*, 1978) degut a l'existència d'una atmosfera, que encara que sia dèbil pot evitar els impactes petits.

Un dels punts més controvertits de la geodinàmica externa del planeta roig és la presència d'aigua. A Mart es troben moltes morfologies superficials que denoten la presència d'aigua: valls semblants a les fluvials, xarxes de drenatge i rambles. Moltes d'aquestes, quan s'observen detingudament es pot constatar que no tenen les mateixes propietats que les valls terrestres. Tal volta només es deuen a l'acció de corrents subterranis i a l'acció del sol, és a dir, que es podrien haver format més per soscavament que per l'acció de l'aigua d'escorrentia (Bell, 2008). Sembla que en alguns moments de la història de Mart l'aigua líquida ha estat estable sobre el planeta, però no està resolta la incògnita de si aquests períodes humits foren curts i esporàdics com defensa Christensen (2008), basant-se en el fet que s'hagi conservat una superfície marciana vella i l'extensa presència de minerals poc compatibles amb un ambient humit (com l'olivina i els piroxens); o bé que fou un període extens i prolongat entre els 4200 i els 3500 milions d'anys, com defensa Bell (2008) basant-se en la presència de possibles roques evaporítiques com les trobades pels robots Spirit i Opportunity, en l'existència de roques sedimentàries localitzades per l'Opportunity i ja suggerides pel Sojourner, en la localització de dipòsits d'argiles de les terres altes, en la gran erosió que experimenten certes àrees, i en morfologies que suggereixen l'existència de deltes com el trobat a Eberswalde per la nau Mars Global Surveyor.

En tot cas la presència de reserves enormes d'aigua gelada als pols i al subsòl (com demostrà la missió Mars Odyssey gràcies a l'espectròmetre de rajos gamma i al detector de neutrons d'alta energia) és un fet que ha sorprès a la comunitat científica i possibilita l'existència de dipòsits d'aigua líquida en profunditat. En aquest aspecte Mart s'allunya de la seca i totalment deshidratada Lluna per acostar-se un poc més a les condicions terrestres.

## La Lluna i Venus

Els coneixements que tenim sobre la geologia lunar també ens han ajudat a conèixer un poc millor el planeta Venus. Fins als anys seixanta del segle passat no es coneixia pràcticament res de la superfície del planeta germà de la Terra. Se sabia que aquest planeta estava completament cobert de núvols, cosa que despertà la imaginació de molts estudiosos de la planetologia, pensant en un planeta pantanós i humit, que podria estar habitat per criatures diverses. De totes formes la proximitat al Sol feia probable que la temperatura fos massa elevada per a la vida.



**Figura 15:** Imatge tridimensional de la superfície de Venus generada per ordinador. En aquesta es poden veure una agrupació de cràters d'impacte: Saskia de 37,3 km de diàmetre en primer pla, Danilova de 47,6 km de diàmetre a l'esquerra i Aglaonice de 62,7 km de diàmetre a la dreta. Aquesta imatge fou creada superposant les imatges de la sonda Magellan per a la topografia, i la coloració basada en les sondes d'aterratge Venera 13 i 14 (NASA/Cortesia de nasaimages.org).

*Figure 15: Three-dimensional image of the surface of Venus, generated by computer. This can be seen a cluster of impact craters: Saskia 37.3 km in diameter in the foreground, Danilova of 47.6 km in diameter on the left and Aglaonice of 62.7 km in diameter on the right. This image was created by superimposing images from the Magellan probe to the topography, and color based on the lander Venera 13 and 14 (NASA/courtesy of nasaimages.org).*

Des de l'any 1965 es ve estudiant la superfície de Venus amb radars des de la Terra, concretament des de Goldstone, al desert de Mojave i des de l'observatori Arecibo a Puerto Rico. Així es varen poder obtenir imatges d'aquest planeta. Les ones de radar es reflecteixen a la superfície del planeta i són detectades a la Terra. Quan la superfície és llisa per a les ones de ràdio s'observen zones "fosques" si la incidència de les ones no és ben perpendicular (si incidissin perpendicularment es veurien "lluents"), mentre que les superfícies es veuen "lluents" si són rugoses per a les ones de ràdio (si incidissin perpendicularment es veurien "fosques"). Així s'ha pogut treure una imatge general de la seva superfície. També des de l'any 1970 s'han fet observacions amb infrarojos des de la Terra, a través de les clarianes entre els núvols.

Els principals avanços en l'estudi de les característiques superficials de Venus es feren emperò amb les dades obtingudes amb la nau Pioneer Venus 1, a l'any 1978, que tenia com a missió principal l'estudi de l'atmosfera però també tenia un altímetre de radar que mesurava la distància de la superfície planetària mentre orbitava. Així es pogué descobrir per primera vegada la topografia de Venus.

A l'any 1983, les naus soviètiques Venera 15 i 16 també obtingueren imatges amb radar de la superfície de Venus i a l'any 1990, la sonda Galileo en el seu viatge ple de volteres cap a Júpiter també observà amb infrarojos la superfície del planeta a través de les clarianes que li deixaven els núvols. Es pogueren veure les serralades de Venus que ja es coneixien per les observacions amb radar.

L'avenç més important fins ara és deu a la nau Magellan, que entre els anys 1990 i 1993 es dedicà a l'observació amb radar de la superfície de Venus. Va realitzar mapes molt detallats amb una resolució de 100 m de quasi tot el planeta.

La superfície del planeta és bastant llisa, coberta de planes volcàniques i altiplans. Està dominada pel vulcanisme i, en menor grau, pel vent. L'accident més destacat de la superfície venusiana és un relleu d'11 km d'alçada, anomenat Maxwell. Els estudis atmosfèrics també descobriren que Venus no té pràcticament aigua, la seva atmosfera està formada per diòxid de carboni i els núvols són d'àcid sulfúric, amb una pressió superficial de 90 vegades la terrestre i una temperatura de 470°C, amb la qual cosa s'esvaeix la vella teoria d'un planeta humit i habitable.

Com ja hem dit, el vulcanisme domina la geologia de Venus. Les principals construccions volcàniques són: cons volcànics, probables escuts volcànics i calderes (Sagan, 1994). En certs llocs es veu com la lava ha cobert vastes extensions. Les planes volcàniques, que poden tenir més de 200 km de diàmetre, presenten formes peculiars. Entre elles hi ha els "àcars" o "aràcnids" (Sagan, 1994), que són depressions circulars envoltades d'anells concèntrics des de les que parteixen esquerdes superficials. També s'observen les que s'anomenen "coques bombades", que poden correspondre a algun tipus de vulcanisme en forma de dom. També tenim les "corones" que són estructures anulars curioses, alineades al llarg d'extensions de fins a 2000 km.

Una altra estructura que podria tenir equivalent al que s'ha observat a la Lluna són els canals sinuosos, que poden presentar meandres i voltes. Podrien ser equivalents a les *rimae* sinuoses lunars o bé poden ser produïts per lava molt lleugera, aquosa i poc viscosa (Sagan, 1994).

Les imatges de radar obtingudes des de la Terra varen detectar la presència d'estructures circulars similars als cràters d'impacte, a les hores observats sobretot a la Lluna (Pettengill *et al.*, 1980). La presència de cràters d'impacte fou confirmada per la missió Magellan (Fig. 15). La superfície de Venus està crateritzada però molt menys que la de la Lluna o Mart. No existeixen cràters inferiors a uns quants quilòmetres de diàmetre, ja que els asteroides i cometes petits que impacten sobre Venus es desintegren a la densa atmosfera (Sagan, 1994). També s'observen alguns cràters amb morfologies de taques irregulars, que s'atribueixen a restes de cossos impactats fragmentats a causa de la densitat de l'aire. Es veuen molts cràters ben conservats, i un reduït percentatge que estan inundats o coberts de lava.

L'estudi comparatiu de les superfícies crateritzades de Venus amb les de la Lluna i Mart, tal com s'ha observat amb la nau Magellan, han permès deduir que és molt jove (Sagan, 1994). Les zones més antigues tenen una edat de 500 milions d'anys com a molt. Les superfícies més antigues han estat esborrades pel vulcanisme.

Encara hi pot haver vulcanisme actiu a Venus, malgrat no se'n tinguin proves irrefutables. El Maat Mons podria ser un volcà actiu (Sagan, 1994).

De totes formes hi ha diferències entre els cràters d'impacte observats a Venus i els de la Lluna i altres planetes. Les morfologies dels cràters no són exactament les observades a la Lluna, Mercuri i Mart, potser la superfície calenta de Venus fa que es pugui donar una deformació plàstica, que no es dona en els altres cossos (Pettengill *et al.*, 1980).

## Conclusions

Fent una síntesi de les principals característiques geològiques del nostre satèl·lit podem dir que aquest està format per dos tipus de terrenys que corresponen a dues litologies diferents, de diferents edats i generats en condicions diferents. Tenim els terrenys que constitueixen les *terrae* constituïts principalment per anortosita, per acumulació sobre la superfície lunar d'anortita que surava sobre l'oceà de magma just després de l'acumulació dels cossos protoplanetaris que formaren la Lluna. Actualment aquests terrenys es troben molt alterats pels impactes posteriors. Els segons terrenys són els *maria* formats per planes basàltiques que omplen les grans depressions de les conques d'impacte.

Els recents descobriments de les sondes Clementine, Lunar Prospector i Galileo ens han permès veure amb major claredat la distribució dels diferents materials a la Lluna, i resoldre problemes sobre la constitució i origen d'aquesta. El descobriment més important dels realitzats a finals del segle passat fou la presència d'aigua gelada a la Lluna, realitzada per la sonda Clementine i confirmada per la Lunar Prospector. Més recent és el descobriment duit a terme per la sonda LCROSS que estudià els materials ejectats per l'impacte de la carcassa del coet Centaur que la transportà, poc abans d'impactar ella mateixa al fons del cràter *Cabeus*, a la zona d'ombra permanent a prop del Pol Sud lunar. Aquesta confirmà la presència d'aigua i descobrí altres volàtils, entre ells grans quantitats de mercuri, que deguts a la seva toxicitat podria suposar un greu inconvenient per a la utilització de l'aigua atrapada als cràters lunars.

Quant a les estructures que es troben al nostre satèl·lit aquestes corresponen a impactes (conques d'impacte i cràters), al vulcanisme (doms i *rimae* sinuoses), al refredament de les laves (*rimae* rectes dels *maria* i *rupes*) o a la subsidència d'aquestes (*dorsa*). No s'observen signes de tectònica global com els que afecten a la Terra.

De les diferents teories formulades per explicar l'origen de la Lluna, la majoria dels científics actuals defensen la que diu que la Lluna es formà per l'impacte d'un gran cos de mida planetària que col·lisionà contra la Terra. Els materials arrencats per l'impacte, junt amb part del cos impactant, restaren donant voltes a la Terra i s'agruparen per formar la Lluna. Aquesta teoria s'ha vista reforçada per les observacions recents fetes per les sondes Clementine i Lunar Prospector.

En la història de la Lluna podem destacar una sèrie d'esdeveniments:

- En primer lloc, la seva formació que degué produir-se fa uns 4550 milions d'anys.
- En segon lloc, la formació de l'escorça lunar, a partir de l'acumulació d'anortita que surava sobre l'oceà de magma. La solidificació de l'escorça es degué produir fa uns 4200 milions d'anys.
- Després, se seguiren produint impactes que generarien les grans conques. La més antiga és l'Aitken del Pol Sud i la més recent la *Orientale*. Juntament a la formació de les conques, també es produïren nombrosos cràters d'impacte. Aquesta època va durar entre els 4200 milions d'anys i els 3800 milions d'anys. Alguns autors defensen que entre els 3900 i els 3800 milions d'anys es formaren la major part de les conques d'impacte, corresponent al que s'ha anomenat el "gran cataclisme terminal".
- Entre els 3800 i els 3200 milions d'anys va tenir lloc el vulcanisme que omplí la major part de les conques d'impacte, generant els *maria* lunars. Se seguiren produint impactes però amb una intensitat decreixent de forma exponencial.
- Entre els 3200 i els 1000 milions d'anys encara es produïren erupcions volcàniques a certes parts dels *maria*, encara que cada vegada de manera més esporàdica. La freqüència d'impactes es va reduir a l'actual, degut a que ja havien estat escombrats la majoria dels cossos que originaren els grans impactes, i l'activitat d'impactes es degué exclusivament als tipus de cossos que actualment existeixen al Sistema Solar.



- Des de fa 1000 milions d'anys la Lluna només s'ha vista alterada per alguns impactes ocasionals, per l'acció de la radiació solar i per petits moviments de terra deguts a la gravetat lunar.

En conclusió és pot dir que la Lluna és un satèl·lit en què quasi tots els seus materials superficials s'han format fa més de 3000 milions d'anys. Actualment es pot considerar geològicament mort. La seva morfologia superficial es deguda principalment a l'acció dels impactes meteorítics.

Les mostres recollides a la Lluna per les missions Apol·lo nord-americanes i les Luna soviètiques, juntament amb els meteorits d'origen lunar trobats a l'Antàrtida i a zones desèrtiques del nord d'Àfrica i d'Oman, ens han pogut permetre tenir un coneixement amb cert grau de detall sobre la geologia lunar, especialment sobre la mineralogia, petrologia i edats absolutes de formació de determinats terrenys.

L'estudi comparat de la Lluna amb altres cossos planetaris del Sistema Solar ens ha pogut fer veure com degué ser la història antiga de la Terra, abans que es generassin les formacions rocalloses més antigues terrestres que es conserven i que tenen uns 3800 milions d'anys. Per comparació amb la Lluna i altres planetes podem concloure que la Terra es degué veure afectada per nombrosíssims impactes com els que afectaren el nostre satèl·lit. Les sondes que arribaren al planeta Mercuri ens mostraren que aquest té una superfície molt semblant a la lunar, cosa que ens indica que la seva activitat geològica s'aturà a una època molt primerenca, com a la Lluna. També hem pogut observar les semblances dels dos terços meridionals de Mart amb les *terrae* lunars, podent-se estimar que l'edat de la major part del planeta roig correspon als primers 1000 milions d'anys després de la seva formació. Finalment també hem pogut observar cràters d'impacte a Venus, i comparant-lo amb la Lluna podem estimar que les zones més antigues d'aquest planeta no sobrepassen els 500 milions d'anys.

Per acabar farem menció d'aquelles qüestions que encara no tenim resoltes:

- Tengué lloc a la Lluna el “gran cataclisme terminal” que postulen algunes teories? En cas afirmatiu, afectà només al sistema Terra-Lluna o fou generalitzat per a tot el Sistema Solar?
- A què es deuen les diferències entre la cara visible i l'oculta de la Lluna?
- Hi ha terratrèmols a la cara oculta de la Lluna?
- L'oceà de magma que es formà a l'inici de la formació de la Lluna és donà exclusivament a aquesta o també es donà a altres cossos?

## Bibliografia

- Anguita, J. i de la Casa, M.A. (1995). *Contando cráteres: un método para datar superficies planetarias*. Enseñanza de la Ciencias de la Tierra (3.2): 106-110.
- Anguita, F. (1988). *Origen e historia de la Tierra*. Editorial Rueda. Madrid. 525 pp.
- Anguita, F. (1998). *Historia de Marte: Mito, exploración, futuro*. Editorial Planeta. Barcelona. 314 pp.
- Arvidson, R.E., Binder, A.B. i Jones, K.L. (1978). *La superficie de Marte*. Investigación y Ciencia, 20: 26-39.
- Bell, J. (2008). *Agua en Marte*. Investigación y Ciencia. Temas 53, Planetas, 66-72.
- Brush, S.G. (1986). *Early History of Selenology*. In: W.K. Hartmann, R.J. Phillips i G.J. Taylor (eds.). *Origin of the moon, Proceedings of the conference, Kona, Hawaii, October 13-16*. Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas. 3-15.



- Christensen, P.R. (2008). *Estratigrafía y relieve de Marte*. Investigación y Ciencia. Temas 53, Planetas, 50-57.
- Colaprete, A., Schultz, P., Heldmann, J., Wooden, D., Shirley, M., Ennico, K., Hermalyn, B., Marshall, W., Ricco, A., Elphic, R.C., Goldstein, D., Summy, D., Bart, G.D., Asphaug, E., Korycansky, D., Landis, D. i Sollitt, L. (2010). *Detection of water in the LCROSS ejecta plume*. Science, 330(6003): 463-468.
- Darwin, G. (1878). *On the precession of a viscous spheroid*. Nature, 18: 580-582.
- Darwin, G. (1879). *On the precession of a viscous spheroid and on the remote history of the Earth*. Phil. Trans. Roy. Soc. London, 170: 447-538.
- Gladstone, R.G., Hurley, D.M., Retherford, K.D., Feldman, P.D., Pryor, W.R., Chaufray, J.-Y., Versteeg, M., Greathouse, T.K., Steffl, A.J., Throop, H., Parker, J.W., Kaufmann, D.E., Egan, A.F., Davis, M.W., Slater, D.C., Mukherjee, J., Miles, P.F., Hendrix, A.R., Colaprete, A. i Stern, A.S. (2010). *LRO-LAMP observations of the LCROSS impact plume*. Science, 330(6003): 472-476.
- Hartmann, W.K. i Davis, D.R. (1974). *Satellite-sized planetesimals and lunar origin*. (International Astronomical Union, Colloquium on Planetary Satellites, Cornell University, Ithaca, N.Y. 18-21 august 1974). Icarus, 14: 504-515.
- Jewitt, D.C., Sheppard, S.S. i Kleyna, J. (2008). *Satélites irregulares*. Investigación y Ciencia. Temas 53, Planetas, 74-81.
- Murray, B.C. (1975). *Mercury*. Scientific American, 233(3): 58-69.
- Pettengill, G.H., Campbell, D.B. i Masursky, H. (1980). *La superficie de Venus*. Investigación y Ciencia, 49.
- Ortiz, J.L. (2001). *Secretos lunares. Detección de destellos ocasionales*. Investigación y Ciencia, 301: 40-41.
- Roche, E. (1873). *Essai sur la constitution et l'origine du système solaire*. Mem. Acad. Sci. Lett. Montpellier, Sec. Sci., 8: 235-324.
- Raeburn, P. i Golombek, M. (1998). *Marte: descubriendo los secretos del planeta rojo*. National Geographic Society. RBA publicaciones. Barcelona. 232 pp.
- Reed, G.W. (1999). *Don't drink the water*. Meteoritics & Planetary Science, 34(5): 809-811.
- Romero, J. i Crespí, D. (1992). *Recursos minerales para el emplazamiento de una base lunar*. III Congreso Geológico de España y VIII Congreso Latinoamericano de Geología. Actas tomo 2: 567-571.
- Sagan, C. (1994). *Un punto azul pálido*. Editorial Planeta. Barcelona. 429 pp.
- Schultz, P.H., Hermalyn, B., Colaprete, A., Ennico, K., Shirley, M. i Marshall, W.S. (2010). *The LCROSS cratering experiment*. Science, 330(6003): 468-472.
- See, T.J.J. (1909a). *Dynamic theory of the capture of satellites and of the division of nebulae under the secular action of a resisting medium*. Astr. Nachr., 181: 333-350.
- See, T.J.J. (1909b). *Origin of the lunar terrestrial systems by capture with further consideration on the theory of satellites and on the physical cause which has determined the directions of rotations of the planets about their axes*. Astr. Nachr., 181: 365-386.
- Sleep, N.H. (1994). *Martian plate tectonics*. Journal of Geophysical Research, 99-E3: 5639-5655.
- Smoluchowski, R. (1986). *El sistema solar*. Biblioteca Scientific American, Prensa Científica, Editorial Labor. Barcelona. 179 pp.
- Spudis, P.D. (2008). *La nueva luna*. Investigación y Ciencia. Temas 53, Planetas, 90-96.
- Strahler, A.N. (1992). *Geología física*. Ediciones Omega. Barcelona. 629 pp.
- Wetherill, G.W. (1981). *Nature and origin of basin-forming projectiles*. In Multi-ring basin: Lunar and Planetary Science Conference Proceedings 12, pt. A. 1-18.

- Wilhelms, D.E. (1987). *Geologic History of the Moon*. U. S. Geological Survey Professional Paper 1348. Denver. 314 pp.
- Wood, J.A. (1986). *Moon over Mauna-Loa - A review of hypotheses of formation of Earth's moon*. In: W.K. Hartmann, R.J. Phillips i G.J. Taylor (eds.). *Origin of the moon*, Proceedings of the conference, Kona, Hawaii, October 13-16. Lunar and Planetary Institute, Houston, Texas. 17-35.